



TESIS - TM142501

**STUDI NUMERIK PADA ROTOR TURBIN
SAVONIUS DAN ICEWIND DENGAN
PERBANDINGAN METODE *FLUID STRUCTURE
INTERACTION* (FSI) DAN STATIS**

ZAIN LILLAHULHAQ
NRP 02111650020011

DOSEN PEMBIMBING
Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG REKAYASA KONVERSI ENERGI
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019



TESIS - TM142501

**STUDI NUMERIK PADA ROTOR TURBIN
SAVONIUS DAN ICEWIND DENGAN
PERBANDINGAN METODE *FLUID STRUCTURE
INTERACTION* (FSI) DAN STATIS**

ZAIN LILLAHULHAQ
NRP 02111650020011

DOSEN PEMBIMBING
Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG REKAYASA KONVERSI ENERGI
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:
Zain Lillahulhaq
NRP. 02111650020011

Tanggal Ujian : 14 Desember 2018
Periode Wisuda : Maret 2019

Disetujui oleh:

1. Vivien Suphandani Djanali, ST., M. E., Ph.D
NIP. 198105292003122001

(Pembimbing I)

2. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA
NIP. 196001291987011001

(Penguji)

3. Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., Ph.D
NIP. 196412281990031002

(Penguji)

4. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT
NIP. 197104051997021001

(Penguji)



Dekan Fakultas Teknologi Industri

Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST., MT.
NIP. 196905071995121001

STUDI NUMERIK PADA ROTOR TURBIN SAVONIUS DAN ICEWIND DENGAN PERBANDINGAN METODE FLUID STRUCTURE INTERACTION (FSI) DAN STATIS

Nama : Zain Lillahulhaq
NRP : 2116 202 011
Jurusan : Teknik Mesin, FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., P.hD.

ABSTRAK

Performa turbin dapat ditingkatkan dengan melakukan optimasi desain pada bentuknya. Namun simulasi turbin *Savonius* banyak dilakukan dengan memasukan kecepatan angular sudut. Nilai kecepatan sudut diperoleh dari eksperimen yang dilakukan sebelumnya. Hal ini akan menjadi masalah saat simulasi dilakukan pada turbin bentuk baru. Selain itu nilai kecepatan sudut seharusnya terjadi akibat adanya udara dengan kecepatan tertentu yang menyebabkan inersia pada turbin. Kondisi ini dapat disimulasikan dengan menggunakan *fluid structure interaction* dengan metode *1 degree of freedom*.

Pada penelitian ini akan digunakan turbin *straight Savonius* tipe S dan *Icewind* turbin. Simulasi dilakukan dengan *Software numerik komersial* dengan model 3 D. Fluida yang digunakan adalah udara baik pada kondisi *steady* dan *unsteady incompressible, viscous*, dan *uniform* pada aliran *freestream inlet*. Permodelan benda dilakukan pada kondisi *1 degree of freedom* dengan *meshing* berupa *overset mesh*.

Turbin *Icewind* dapat menghasilkan *coefficient power* yang cukup tinggi pada kecepatan dibawah 4 m/s. Hal ini disebabkan akibat bentuk unsymetric *Icewind* terhadap ketinggian turbin. Bentuk *Icewind* yang berlekuk menyebabkan fluida lebih mudah mengalir kebelakang sudu dan menekan daerah *wake*. Pada turbin *Savonius* yang dilengkapi *endplate* mampu menghasilkan kecepatan angular dan *coefficient power* yang tinggi. Aliran *wake* pada *advancing blade* akan mengalir melewati *overlap* yang berada di antara sudu. Aliran ini kemudian akan mengisi daerah kosong yang terbentuk dan mengurangi munculnya *backflow*.

Kata kunci : *Savonius, Icewind, gaya drag, koefisien power, koefisien momen.*

NUMERICAL STUDY ON SAVONIUS AND ICEWIND WINDTURBINE ROTOR COMPARATION WITH FLUID STRUCTURE INTERACTION (FSI) AND STATIC METHODE

Student Name : Zain Lillahulhaq
NRP : 2116 202 011
Programme : Mechanical Engineering, FTI-ITS
Supervisor : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., P.hD.

ABSTRACT

Windturbine performance can be increase by using optimum shape. Meanwhile some Savonius windturbine simulation are using constant angular velocity as input data. The value of constant angular velocity can be obtained from experimental data. Angular velocity should be resulted by interaction between fluid around windturbine which change moment of inertia. Rotation of windturbine can be simulated with fluid structure interaction in 1 degree of freedom methode.

This study is using straight Savonius tipe S and Icewind turbine. The windturbines are simulated by using comercial numeric software in 3D models. In steady and unsteady simulation, fluid define as incompressible, viscous, and uniform air which flow from inlet freestream. Simulation object rotate in 1 degree of freedom in overset mesh area.

Icewind turbine generate high number of coefficient power when it rotate by inlet freestream below 4 m/s. This phenomenom are affected by unsymmetrical shape of Icewind which allowed fluid flow behind reversing blade and sweep away wake area. Savonius windturbine, which accompalised with endplate and overlap, rotate in high angular velocity and generate highest value of coefficient power. Vortex among advancing blade are flow trough overlap. This stream flow and fill empty area and reduce backflow behind reversing blade.

Keywords : Savonius, Icewind, Drag force, coefficient of power, coefficient of momen.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas segala karunia dan ridlo-Nya tesis dengan judul “Studi Numerik Pada Rotor Turbin Savonius dan Icewind Dengan Perbandingan Metode Fluid Structure Interaction (FSI) Dan Statis” ini dapat diselesaikan.

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang keahlian Rekayasa Konversi Energi pada Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar besarnya kepada:

1. Ibu Vivien Suphandani Djanali, ST., M. Eng., Ph.D, selaku dosen pembimbing yang selalu menyediakan waktu dan fasilitas serta dengan sabar mengarahkan penulis dalam menyelesaikan tesis ini dengan baik.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA, Ph. D., Bapak Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., Ph.D, Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT, dan Bapak Bambang arip Dwiyanoro, ST., M.Eng, Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak masukan dan saran pada saat seminar proposal dan seminar hasil tesis.
3. Orang tua penulis serta seluruh keluarga besar yang selalu memberikan support, do’a dan semangat selama studi hingga akhir studi.
4. Teman-teman Pascasarjana Teknik Mesin dan teman dekat yang telah memberikan dukungan dan sarannya selama studi hingga akhir studi.

Tesis ini masih jauh dari sempurna, oleh sebab itu penulis berharap kritik dan saran yang bersifat membangun demi penulisan dimasa mendatang. Penulis juga berharap tesis ini dapat memberikan manfaat untuk penerapan teknologi kedepannya.

Surabaya, 18 Januari 2018

Penulis

Daftar Isi

LEMBAR PENGESAHAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
Daftar Isi	viii
Daftar Gambar.....	x
Daftar Tabel	xiv
BAB I.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II	7
2.1 <i>Vertical Axis Wind turbine</i>	7
2.2 Turbin <i>Savonius</i>	8
2.3 <i>Icewind turbin</i>	10
2.3 Komponen Perhitungan Turbin <i>Savonius</i> dan <i>Icewind</i>	11
2.4 Penelitian Eksperimen Turbin <i>Savonius</i>	16
2.5 Penelitian Numerik Turbin <i>Savonius</i>	17
2.6 Eksperimen <i>Icewind turbin</i>	22
2.7 <i>Fluid Structure Interaction</i>	23
2.8 <i>Sliding Mesh</i>	24
2.9 Data Acuan Validasi.....	24
BAB III.....	27
3.1 Pre-processing	27
3.1.1 Model Benda Uji.....	27
3.1.2 Domain Simulasi dan <i>Boundary condition</i>	30
3.1.3 <i>Meshing</i>	31
3.2. <i>Processing</i>	32

3.2.1 <i>Processing steady</i>	32
3.2.2 <i>Processing unsteady</i>	32
3.3. <i>Post-Processing</i>	35
3.3.1 <i>Post processing simulasi steady</i>	35
3.3.2 <i>Post processing simulasi unsteady</i>	36
3.4. <i>Grid Independensi</i>	38
3.5. <i>Flowchat Penelitian</i>	38
BAB IV	41
4.1. Perbandingan Metode Simulasi Turbin <i>Savonius Endplate</i>	42
4.1.1 Hasil Simulasi Turbin <i>Savonius Endplate</i> Pada Berbagai Metode.....	43
4.1.2 Perbandingan Efektifitas Metode Simulasi.....	45
4.3. <i>Simulasi Steady</i>	46
4.3.1 <i>Velocity vector</i>	47
4.3.2 <i>Static pressure contour</i>	51
4.3.3 <i>Vorticity contour</i>	54
4.3.4 <i>Pathline</i> aliran.....	59
4.3.5 Momen	63
4.4. Simulasi <i>unsteady</i> FSI-1DOF.....	65
4.4.1 Performa Turbin.....	67
4.4.2 Nilai Maksimum dan optimum.....	68
BAB V	75
5.1. Kesimpulan.....	75
5.2. Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	77

Daftar Gambar

Gambar 2. 1 Turbin VWAT (a) <i>Savonius</i> (b) <i>Darrieus</i> eggbeater (c) H- <i>Darrieus</i> ..	8
Gambar 2. 2 Turbin <i>Savonius</i> dan dimensi (a) tampak samping (b) tampak atas pada turbin dengan 2 sudu (Mahmoud dkk,2010)	9
Gambar 2. 3 Visualisasi partikel disekitar <i>Savonius wind turbine</i> (Murai <i>et al</i> ,2007).	9
Gambar 2. 4 Contoh penampang <i>Icewind turbine</i> (Aymane <i>et al</i> , 2017).....	10
Gambar 2. 5 Luasan dengan pendekatan integral sudut rotor (Ali,2013).	14
Gambar 2. 6 Pembuatan geometri <i>Icewind turbine</i>	15
Gambar 2. 7 Contoh pengambilan data dengan bantuan <i>load brake</i> (Jeon <i>et al</i> , 2014).	18
Gambar 2. 8 Eksperimen <i>Icewind turbin</i> Aymane (2017).	23
Gambar 2. 9 Bentuk <i>stage</i> dan dimensi pada eksperimen Saha (2008).	25
Gambar 2. 10 Hasil eksperimen (a) <i>velocity inlet-C_p</i> (b) <i>velocity inlet- velocity angular</i> pada penelitian Saha(2008).	25
Gambar 3. 1 Material uji turbin <i>Savonius</i> (a) dengan <i>endplate</i> (b) tanpa <i>endplate</i>	28
Gambar 3. 2 (a) Bidang yang diproyeksikan ke <i>Savonius</i> turbin (b) <i>Icewind turbin</i> hasil <i>extrude cut</i> tampak depan (b) tampak atas.	29
Gambar 3. 3 <i>Boundary condition</i> dan ukuran <i>test section</i> (a) tampak atas (b) tampak samping	30
Gambar 3. 4 <i>Mesh</i> (a) potongan penampang tengah <i>wind turbine</i> (b) turbin (c) perbesaran bagian overset pada jumlah sel 200.000	31
Gambar 3. 5 Hasil simulasi <i>steady</i> pada turbin <i>Savonius</i> dengan <i>endplate</i> sudut azimuth 20°.	36
Gambar 3.7 Data kualitatif <i>midplan velocity contour</i> simulasi <i>steady</i> pada turbin <i>Savonius</i> dengan <i>endplate</i> sudut azimuth 20°.	36
Gambar 3.8 Data kuantitatif simulasi <i>unsteady</i> pada turbin <i>Savonius</i> dengan <i>endplate</i>	37
Gambar 4. 1 Sudut azimuth pada (a) <i>Savonius</i> dan (b) <i>Icewind</i>	42

Gambar 4. 2 <i>Velocity vector</i> pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° dan 30°	47
Gambar 4. 3 <i>Velocity vector and contour</i> pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° , 30° , 70° , dan 110°	49
Gambar 4.4 <i>Velocity vector</i> dan <i>contour</i> pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° dengan plane 0.05H, 0.5H dan 0.8H.....	50
Gambar 4. 5 <i>Pressure contour</i> pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° , 30° , 70° , dan 110°	52
Gambar 4. 6 <i>Pressure contour</i> pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° dengan plane 0.05H, 0.5H dan 0.8H.....	53
Gambar 4. 7 Letak poin pengambilan data tekanan.....	54
Gambar 4.8 <i>Vorticity contour</i> pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° , 30° , 70° , dan 110°	56
Gambar 4. 9 Perbandingan (a) <i>Vorticity contour</i> ,(b) <i>pressure contour</i> dan (c) <i>velocity vector</i> pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° .	57
Gambar 4. 10 <i>Vorticity contour</i> pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° dengan plane 0.05H, 0.5H dan 0.8H.....	58
Gambar 4. 11 Potongan penampang pada <i>pathline</i>	59
Gambar 4. 12 <i>Pathline</i> turbin <i>Icewind</i> pada kecepatan 5 m/s.....	60
Gambar 4. 13 <i>Pathline</i> turbin <i>Savonius</i> tanpa <i>endplate</i> pada kecepatan 5 m/s.....	61
Gambar 4. 14 <i>Pathline</i> turbin <i>Savonius</i> tanpa <i>endplate</i> dan <i>Icewind</i> pada 5 m/s .	61
Gambar 4. 15 <i>Pathline</i> turbin <i>Savonius</i> dengan <i>endplate</i> pada kecepatan 5 m/s..	62
Gambar 4.16 Grafik C_Q terhadap sudut azimuth kecepatan 5 m/s.....	63
Gambar 4. 17 Grafik C_Q terhadap kecepatan inlet	65
Gambar 4. 18 Grafik (a) <i>Physical time</i> -kecepatan angular (b) <i>Physical time</i> - momen(c)TSR- C_p pada simulasi FSI 1-DOF turbin <i>Savonius</i> dengan <i>Endplate</i>	66
Gambar 4. 19 Grafik C_p terhadap TSR kecepatan 2 m/s.....	67
Gambar 4. 20 Grafik C_p terhadap TSR turbin <i>Savonius</i> dengan <i>Endplate</i>	69
Gambar 4. 21 Grafik C_p maksimum dan optimum terhadap sudut azimuth	71
Gambar 4. 22 Grafik C_Q maksimum dan optimum terhadap sudut azimuth	71

Gambar 4. 23 <i>Velocity vector</i> absolut dan <i>pressure contour</i> pada Savonius <i>endplate</i>	72
Gambar 4. 24 <i>Pathline</i> pada Savonius <i>endplate</i>	73

Halaman ini sengaja dikosongkan

Daftar Tabel

Tabel 2. 1 Penelitian eksperimen turbin <i>Savonius</i>	16
Tabel 2. 2 Penelitian simulasi turbin <i>Savonius</i>	18
Tabel 2. 3 Hasil penelitian <i>Icewind turbin</i> Aymane (2017).....	23
Tabel 3. 1 Dimensi benda uji Turbin Savonius dengan endplate Saha(2008)	28
Tabel 3. 2 Perbandingan Dimensi Turbin	29
Tabel 3. 3 <i>Boundary condition</i> simulasi <i>Savonius</i>	33
Tabel 3. 4 <i>Input data</i>	34
Tabel 3. 5 Grid independency	38
Tabel 4. 1 Perbandingan C_Q dan C_P pada turbin Savonius endplate dengan berbagai metode.....	44
Tabel 4. 2 Efektifitas metode simulasi.....	46
Tabel 4. 3 Selisih tekanan pada daerah <i>upstream</i> dan <i>downstream</i>	54
Tabel 4. 4 Momen simulasi <i>steady</i>	64
Tabel 4. 5 Nilai pada TSR maksimum simulasi <i>unsteady</i> 1 - DOF	68
Tabel 4. 6 Nilai optimum simulasi <i>unsteady</i> 1 - DOF	68

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Angin merupakan salah satu sumber *renewable* energi mulai banyak dikembangkan oleh manusia. Turbin VWAT *Savonius* merupakan alat pengubah energi angin menjadi listrik yang banyak digunakan manusia saat ini . Beberapa pengembangan dilakukan mendapatkan hasil optimum turbin VWAT *Savonius*. Langkah yang ditempuh diantaranya adalah dengan menambah mengubah bentuk sudu, mengkombinasikan *Savonius* dengan *Darrieus*, menambahkan pengarah aliran hingga memvariasikan bentuk *endplate*. Perubahan performa turbin *Savonius* dapat dilihat dari data kuantitatif berupa kecepatan angular dan torsi yang dihasilkan setiap model. Saat ini untuk mendapatkan data kualitatif dan kauntitatif yang lebih teliti, penggunaan metode simulasi perlu dilakukan seiring dengan meningkatnya kemajuan teknologi.

Simulasi numerik yang dilakukan terhadap turbin *Savonius* banyak menggunakan kecepatan angular konstan sebagai *input* data awal. Padahal pada kondisi aktual torsi dan putaran yang dihasilkan turbin *Savonius* hanya berasal dari kecepatan *inlet* udara yang menabrak turbin yang memiliki inersia tertentu. Penggunaan kecepatan angular konstan sebagai data awal banyak digunakan dalam penelitian *wind turbin* seperti **Akwa et al (2011)**, **Mao dan Tian (2015)**, dan **Shaheen (2015)**. Padahal **Wakui (2008)** menyatakan bahwa proses penambahan beban pada saat menentukan fungsi TSR (*Tip Speed Ratio*) dapat menyebabkan fluktuasi *output* turbin. Pembebanan yang dimaksudkan adalah beban, gaya atau kondisi yang diaplikasikan pada turbin agar berputar konstan saat pengambilan data TSR.

Pada kondisi eksperimen pemberian beban bertujuan untuk mendapatkan nilai torsi dari putaran turbin *Savonius*. Namun penambahan *load* menyebabkan perubahan momen inersia dan pergeseran pusat massa. Apabila hal ini terjadi momen yang dihasilkan bisa jadi berbeda dengan kondisi sebenarnya. Sehingga validasi data simulasi sebaiknya tidak dilakukan dengan data eksperimen yang diberi pembebanan maupun *brake*. Pernyataan ini diperkuat penelitian **Al-Faruk et al (2012)** tentang pengaruh kondisi *loading* dan *unloading* turbin *Savonius*

dengan komputasi 2D. Penelitian dilakukan dengan 1 *degree of freedom* (DOF) *Sliding Mesh* model. Metode penelitian yang digunakan pada simulasi ini adalah meninjau interaksi antara fluida dengan struktur yang dilaluinya. Metode tersebut disebut dengan *Fluid structure interaction* (FSI). Beban yang diberikan pada turbin sebesar 5 Nm dengan arah yang berlawanan terhadap arah putar. Grafik C_P – TSR menunjukkan bahwa kondisi turbin dengan pembebanan akan menghasilkan nilai C_P yang lebih tinggi pada TSR yang sama. Data yang dihasilkan *Savonius* tanpa beban juga lebih cepat mencapai kondisi *steady*. Adanya perbedaan hasil pada kondisi dengan dan tanpa pembebanan, mengharuskan peneliti untuk menghindari pemberian kondisi awal torsi dan kecepatan sudut pada simulasi turbin *Savonius*. Hal ini dilakukan agar eror dari data yang didapat semakin kecil.

Selanjutnya **Al-Faruk (2017)** menyelesaikan kasus *unsteady swirling Savonius turbine* dengan metode FSI *mesh Sliding*. Awalnya pengujian secara *steady* dilakukan pada kecepatan sudut tertentu untuk proses validasi. Error data yang dapat dari validasi sekitar 4.7%. Kemudian simulasi dilakukan dengan kondisi *unsteady* pada kecepatan angular dan torsi awal 0. Pada penelitian ini data diambil pada *time-step* 0.005 - 0.006 sekon dengan intensitas turbulensi 5% SST *k- ω* . Simulasi ini mampu memberikan kecepatan angular maksimum yang dihasilkan oleh turbin, namun proses validasi data *unsteady* yang dihasilkan penelitian tidak dilakukan.

Untuk memperkecil kemungkinan eror, proses simulasi sebaiknya dilakukan semirip mungkin dengan kondisi eksperimen di dalam *windtunnel*. Validasi yang dilakukan terhadap simulasi *unsteady* juga harus dilakukan dengan data acuan yang diambil tanpa menentukan kecepatan angular konstan. Data acuan yang tersedia mayoritas menggunakan nilai TSR yang didapat dari pembebanan seperti milik **Sheldahl (1997)** tidak dapat digunakan. Penggunaan nilai kecepatan angular konstan menyebabkan peneliti akan mengalami kesulitan untuk menemukan titik optimum sebenarnya pada turbin. Dibutuhkan pedoman langkah penelitian yang dapat digunakan sebagai acuan simulasi seperti **Nasef et al (2013)**. Penelitian ini tidak memiliki data acuan validasi, sehingga proses validasi metode perlu dilakukan terlebih dahulu. Penelitian **Nasef et al (2013)** terdiri dari eksperimen, numerik *steady* dan *unsteady*. Validasi metode diawali

dengan proses simulasi 2D *steady* turbin *Savonius* **Fujisima** dan **Hayashi** dengan *software Gambit 2.3.16* dan *Fluent 6.3.26*. Turbin model baru kemudian disimulasikan dengan langkah yang sama untuk mendapatkan data *angle of attack* dan *coefficient torque* statis. Hasil eksperimen dan simulasi terhadap turbin baru menunjukkan *trendline* yang sama persis, sehingga *boundary* simulasi *steady* dapat digunakan sebagai data acuan simulasi *unsteady*. Simulasi *unsteady* 2D turbin *Savonius* baru dilakukan terakhir pada kecepatan 6 m/s dengan TSR 0.2 – 1.4. Penelitian ini memberikan pedoman simulasi terhadap bentuk baru dari turbin *Savonius*. Kekurangan dari penelitian **Nasef et al (2013)** adalah kondisi *unsteady* disimulasikan dengan memasukkan kecepatan awal, sehingga akan kembali kepada kekurangan sistem TSR.

Simulasi dengan menggunakan TSR tertentu tidak dapat dilakukan pada turbin bentuk baru yang belum diuji secara eksperimen. Turbin bentuk baru, seperti *Icewind turbin*, belum diketahui titik optimum kinerjanya. Penelitian yang dilakukan **Aymane (2017)** tentang *Icewind turbine* dilakukan secara numerik dan eksperimen. Simulasi numerik dilakukan secara 2 dan 3 dimensi dalam kondisi statis. Penelitian eksperimen dilakukan tanpa menggunakan pembebanan. Namun data yang didapat masih sangat sedikit dan tidak divalidasi dengan penelitian lain.

Penelitian ini akan difokuskan pada simulasi turbin *Savonius* 3D *unsteady* yang bergerak disebabkan oleh interaksi kecepatan angin disisi *inlet* dengan sudu rotor. Proses simulasi diharapkan dapat berlangsung sesuai dengan kondisi lapangan. Proses validasi akan dilakukan dengan data simulasi yang diambil tanpa pembebanan. Melalui penelitian ini akan diperoleh pedoman untuk melakukan simulasi optimasi turbin *Savonius* terutama pada bentuk geometri baru seperti *Icewind turbin* secara akurat.

1.2 Rumusan Masalah

Simulasi numerik turbin *Savonius* mayoritas menggunakan metode *input* kecepatan angular turbin untuk mendapatkan nilai TSR. Penggunaan *rotating constant* dimungkinkan memiliki perbedaan antara hasil simulasi numerik dengan kondisi sebenarnya lapangan. Selain itu *input* nilai kecepatan angular simulasi dinilai kurang tepat. Kecepatan angular seharusnya bukan merupakan nilai *input*,

namun kecepatan angular adalah hasil dari interaksi fluida yang memutar sudu pada 1 sumbu putarnya. Untuk mengatasi masalah ini diperlukan adanya analisa interaksi aliran fluida pada kecepatan *inlet* tertentu, dengan sudu turbin *Savonius*. Metode analisa yang digunakan adalah *Fluid structure interaction* (FSI). Simulasi FSI pada simulasi ini ditinjau pada 1 sumbu putar (1 degree of freedom). Hasil yang diperoleh dari simulasi 1-DOF dibandingkan dengan simulasi pada kondisi *steady* saat turbin dalam kondisi diam (statis). Melalui proses simulasi yang dilakukan diharapkan didapatkan metode yang sesuai untuk mensimulasikan turbin angin vertical axis. Sistem analisa yang diperoleh dengan metode static maupun FSI, diharapkan mampu memberikan informasi mengenai performa kerja turbin *Savonius* dengan sudu reguler maupun yang dimodifikasi. Sehingga akan diperoleh kondisi optimum performa wind turbin yang sesuai untuk diaplikasikan di Indonesia.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian diantara lain adalah:

1. Mendapatkan nilai momen, torsi, dan putaran dari turbin *Savonius* dan *Icewind* turbine dengan asumsi *steady* dan *unsteady* pada berbagai posisi sudut dan kecepatan.
2. Mendapatkan data kualitatif berupa kontur tekanan, *vorticity* dan vektor kecepatan dari turbin *Savonius* dan *Icewind* turbin dengan asumsi *steady* dan *unsteady* 1 DOF
3. Mendapatkan perbandingan efisiensi metode simulasi yang pada berbagai metode
4. Mendapatkan performa turbin sebagai fungsi TSR dengan metode 1-DOF

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini akan difokuskan pada proses simulasi yang tepat tanpa adanya pembebanan. Pada kasus ini turbin akan berputar dengan sendirinya tanpa *input* kecepatan angular. Oleh karena itu diperlukan batasan masalah agar penelitian dapat mencapai tujuan, diantaranya :

1. Penelitian dilakukan dengan *Software numerik komersial* dengan model 3 dimensi.

2. Tipe turbin angin yang digunakan adalah turbin *straight Savonius* tipe S tanpa maupun dengan *endplate*, dan turbin *Savonius* modifikasi berbentuk *Icewind* pada luas area yang sama.
3. Fluida yang digunakan pada simulasi *steady* dan *unsteady* adalah udara dengan kondisi *incompressible*, dan *viscous*
4. Aliran freestream pada *inlet* bersifat uniform dan searah
5. Benda bergerak 1-DOF dengan tipe *mesh overset mesh*.
6. Kondisi awal turbin pada simulasi FSI adalah diam dengan nilai kecepatan angular awal 0 rad/s
7. Struktur turbin rigid pejal dan tidak mengalami defleksi akibat putaran
8. Momen inersia awal pada simulasi FSI berasal dari berat turbin dan *endplate*
9. Pengaruh ground diabaikan
10. Shaft pada *Icewind* dan *Savonius* tanpa *endplate* merupakan sambungan las

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat setelah melakukan penelitian studi numerik ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan gambaran mengenai performa turbin *Savonius* reguler dibandingkan dengan turbin *Savonius* modifikasi tipe *Icewind*
2. Memberikan gambaran mengenai prospek pengaplikasian turbin *Savonius* dan *Icewind* di daerah angin berkecepatan rendah seperti Indonesia

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

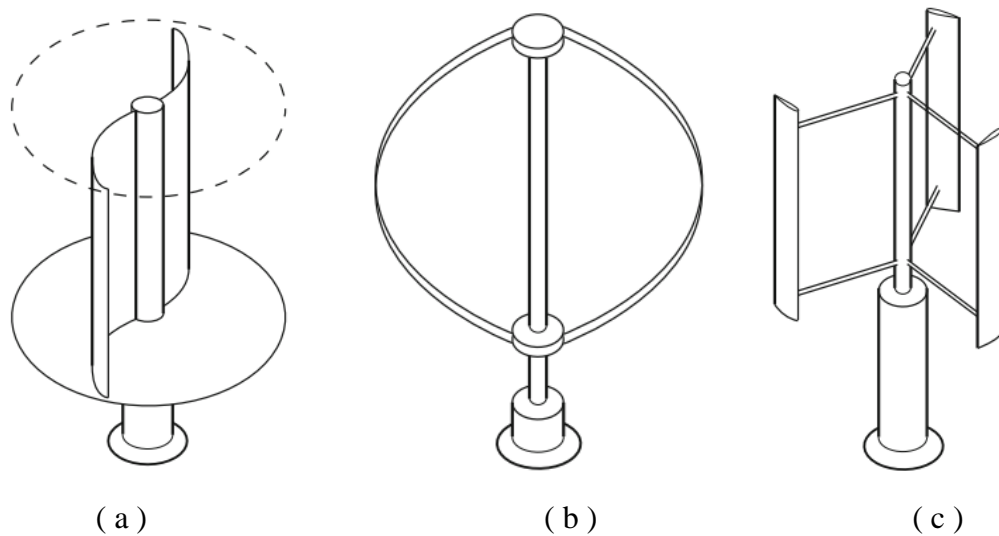
Turbin angin berdasar arah poros putarannya dibagi mejadi 2 yaitu *horizontal axis wind turbine* (HAWT) dan *vertical axis wind turbine* (VAWT). HAWT memiliki efisiensi tinggi karena konstruksinya tinggi dimana angin memiliki kecepatan tinggi. Arah kecepatan aliran angin pada HWAT tegak lurus dengan sudu, sehingga daya yang dihasilkan oleh sepanjang penampang sudu lebih tinggi. Disisi lain, turbin VAWT tidak memerlukan konstruksi yang tinggi saat pemasangan dan dapat berputar pada kecepatan angin yang rendah. Turbin VWAT juga tidak memerlukan mekanisme *yaw*. Turbin VAWT fluktuasi daya terhadap perubahan waktu (Magedi dan Norzelawati,2014). VAWT dapat menjadi alternatif di daerah padat penduduk karena tidak bising dan tidak memerlukan area luas.

Salah satu aplikasi turbin VWAT diantaranya digunakan sebagai sumber energi penerangan lampu jalan raya (Ricci *et al*,2014). Turbin VWAT dipasang dalam jumlah *stage* tertentu dan dikombinasikan dengan penggunaan sel surya. Listrik yang dihasilkan akan digunakan untuk menyalakan lampu jalan. Selain itu tubin VWAT juga dapat digunakan untuk mengkonversikan energi kinentik angin di jalan tol menjadi energi listrik (Santhakumar *et al*,2008). Gerakan aerodinamis kendaraan di jalan tol menghasilkan angin berkecepatan rendah disekelilingnya. Energi kinentik angin akan menggerakkan turbin VWAT kemudian menghasilkan listrik.

2.1 Vertical Axis Wind turbine

Berdasarkan bentuk *blade* yang digunakan turbin VAWT memiliki 2 spesifikasi model yaitu *Darrieus* dan *Savonius*. Turbin *Darrieus* memiliki *blade* berupa airfoil yang berputar akibat adanya gaya *lift*. Sedangkan turbin *Savonius* memiliki *blade* melengkung setengah silinder, yang bekerja akibat adanya gaya *drag*. Turbin *Darrieus* memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sovonius. Tetapi turbin *Darrieus* tidak mampu melakukan proses *self starting*. Selain itu turbin *Savonius* dapat digunakan pada kondisi kecepatan angin rendah.

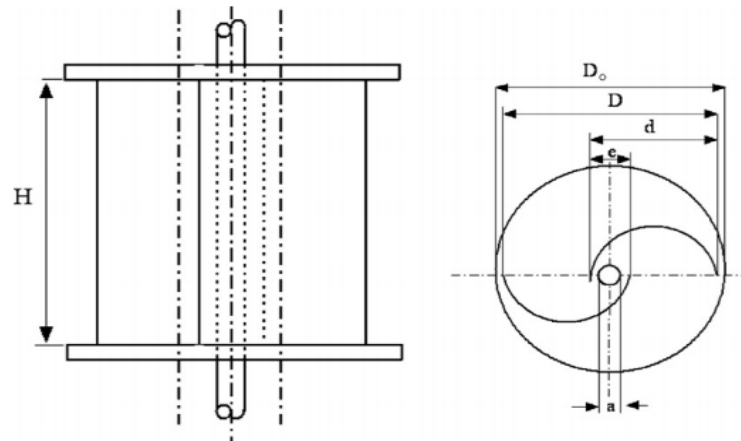
Turbin darrius dan *Savonius* dapat dikombinasikan untuk meningkatkan kinerja turbin. Bentuk yang dikombinasikan bisa berupa *Savonius* dengan *Darrieus* eggbeater atau pun *Savonius* dengan H-*Darrieus*. Penggunaan turbin kombinasi bertujuan untuk memicu proses *self-starting* turbin. Selain itu pemasangan turbin kombinasi bertujuan untuk meningkatkan efisiensi turbin *Savonius*.



Gambar 2. 1 Turbin VWAT (a) *Savonius* (b) *Darrieus* eggbeater (c) H-*Darrieus*

2.2 Turbin *Savonius*

Turbin *Savonius* merupakan turbin yang memiliki bentuk sederhana dan mudah dibuat. Sudu turbin *Savonius* memiliki berbentuk semi sirkular yang dipasang dengan arah yang berbeda. Sudu yang dimiliki turbin *Savonius* berbentuk simetri. Turbin *Savonius* memiliki bagian-bagian seperti yang terlihat pada gambar 2.2. Geometri dan ukuran sudu sangat berpengaruh terhadap performa turbin *Savonius*. *Overlap* dan *aspect ratio* istilah yang berkaitan geometri sudu dan sering divariasikan. *Overlap* merupakan perbandingan antara panjang gap dan diameter sudu. Sedangkan *aspect ratio* merupakan perbandingan antara tinggi (H) dan diameter (D) rotor.



Gambar 2. 2 Turbin *Savonius* dan dimensi (a) tampak samping (b) tampak atas pada turbin dengan 2 sudu (Mahmoud dkk,2010)

Keterangan gambar :

D_o = diameter *endplate*

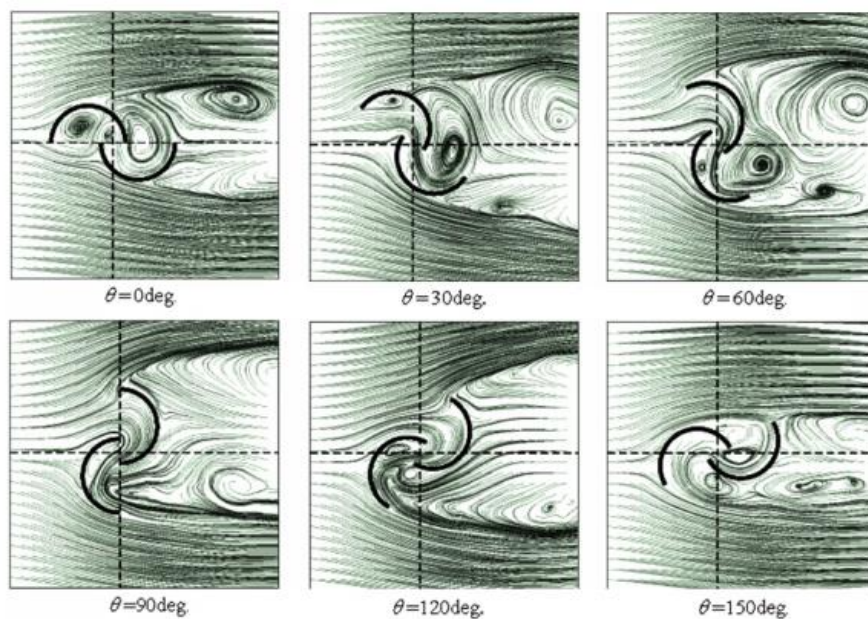
D = diameter rotor

d = diameter sudu

H = tinggi rotor

e = gap

a = diameter sudu



Gambar 2. 3 Visualisasi partikel disekitar *Savonius wind turbine* (Murai *et al*,2007).

Turbin *Savonius* bergerak akibat adanya gaya *drag* yang mendorong *blade*. Aliran udara *freestream* akan menabrak sudu turbin yang berbentuk *concave* dan *convex*. Bilah sudu berbentuk *concave* akan berputar saat tertumbuk oleh aliran *freestream*. Sedangkan aliran *freestream* yang menabrak sudu *convex* akan

terseparasi. Kemudian sebagian aliran tersebut akan mengalir menuju arah *concave* dan sisanya mengalir meninggalkan sudu. Sudu *concave* akan terdorong lebih kuat oleh gaya *drag* sehingga turbin berputar kedepan (*advacing blade*). Sedangkan sudu *convex* akan berputar kebelakang (*returning blade*). Daerah *wake* akan terbentuk dibelakang turbin *Savonius*.

2.3 *Icewind turbin*

Bentuk turbin *Savonius* identik dengan potongan setengah silinder circular yang di pasang dengan berlawanan arah. Namun beberapa peneliti membuat turbin dengan model yang baru untuk meningkatkan efisiensinya. Salah satu turbin yang memiliki model *non-half circular* diteliti **Ayman(2017)** disebut *Icewind turbine*. *Icewind turbine* merupakan potongan asimetris turbin *Savonius* yang banyak digunakan di *Iceland*. Penggunaan turbin ini menghasilkan daya yang besar pada luasan yang lebih kecil. Penggunaan *Icewind turbin* bertujuan untuk menyesuaikan kinerja turbin dengan arah angin. Prinsip kerja *Icewind turbin* sama dengan prinsip kerja *Savonius* yang berputar akibat drag.



Gambar 2. 4 Contoh penampang *Icewind turbine* (Aymane *et al*, 2017).

Iceland memiliki angin dengan kecepatan sangat tinggi pada saat tertentu dan menyebabkan turbin berputar sangat kencang. Kondisi ini dapat menimbulkan panas pada generator dan menyebabkan mesin terbakar. Namun pada suatu titik kecepatan angin di daerah tersebut menjadi sangat rendah sehingga turbin tidak dapat berputar. Penggunaan *Icewind turbin* diklaim dapat memanfaatkan

kecepatan angin pada berbagai kondisi. Pada kecepatan angin rendah turbin dapat menghasilkan daya dan pada kecepatan angin tinggi turbin akan berputar pada kecepatan maksimum konstan.

2.3 Komponen Perhitungan Turbin *Savonius* dan *Icewind*

Dalam menentukan penelitian diperlukan suatu acuan untuk menilai perubahan yang terjadi pada suatu benda uji. Pada turbin *Savonius* terdapat beberapa data kuantitatif yang dapat digunakan sebagai pembandingan kondisi sebelum dan sesudah penambahan variasi. Berikut merupakan penjelasan dari data yang sering digunakan dalam perhitungan *Savonius*:

a. *Tip Speed Ratio* (TSR)

Tip Speed Ratio merupakan bilangan tidak berdimensi yang digunakan untuk menyatakan kecepatan. Nilai TSR didapatkan dari perbandingan antara kecepatan rotor dibandingkan dengan kecepatan *freestream*. Sehingga :

$$TSR = \frac{V_{rotor}}{V_{\infty}} \quad (2.1)$$

$$TSR = \frac{\omega \cdot d}{V_{\infty}} \quad (2.1)$$

Dimana :

TSR = *coefficient of power*

ω = kecepatan sudut *Savonius* (rad/s)

d = diameter *blade Savonius* (m)

V_{∞} = kecepatan *freestream* (m/s)

b. *Coefficient of power* (C_P)

Daya atau *power* merupakan energi yang dihasilkan suatu benda dalam satu sekon. *Coefficient power* adalah bilangan tidak berdimensi yang digunakan untuk menyatakan perbandingan antara *power* aktual yang dihasilkan oleh turbin dibanding dengan total *power* angin. Dalam industri, C_P digunakan untuk menyatakan efisiensi performa turbin. Menurut Betz's limit, nilai maksimum C_P yang dicapai turbin *Savonius* berkisar hingga 59.3%.

$$C_p = \frac{P_{actual}}{P_{wind}} \quad (2.3)$$

$$C_p = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} m v^2} \quad (2.4)$$

$$C_p = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A_s v^3} \quad (2.2)$$

Nilai A_s merupakan luas permukaan penampang turbin yang tersapu oleh angin.

$$A_s = D \cdot H \quad (2.6)$$

Sehingga :

$$C_p = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho \cdot D \cdot H \cdot v^3} \quad (2.3)$$

Dimana :

C_p = coefficient of power

P_{actual} = power yang dihasilkan wind turbine (watt)

P_{wind} = power angin (watt)

T = torsi (Nm)

m = massa (kg)

v = kecepatan angin (m/s)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

A_s = luas sapuan angin (m^3)

D = diameter rotor (m)

H = tinggi rotor (m)

c. Coefficient of torque (C_Q)

Torsi merupakan gaya yang bekerja pada *rigid body* dengan arah tegak lurus pada jarak tertentu dari pusat massa. Koefisien torsi merupakan bilangan tak berdimensi yang menyatakan perbandingan dari torsi aktual dan torsi angin. Koefisien torsi dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$C_q = \frac{T_{actual}}{T_{wind}} \quad (2.8)$$

$$C_q = \frac{T_{actual}}{\frac{1}{4} \rho \cdot A_s \cdot d \cdot v^2} \quad (2.4)$$

Dimana :

C_Q = coefficient of torque

T_{actual} = Torsi *wind turbine* (Nm)

T_{wind} = Torsi angin (Nm)

Pada beberapa penelitian tentang *wind turbine* terdapat torsi dapat dinyatakan sebagai torsi statis dan torsi dinamis. Torsi statis merupakan indikator kemampuan *self starting* dari *wind turbine*. Pengukuran torsi statis dilakukan pada saat turbin dijepit pada posisi sudut tertentu dan tidak mampu berputar. Pada saat tersebut nilai torsi maksimum yang dapat dihasilkan turbin saat di hembus angin diambil sebagai nilai torsi statis. Koefisien torsi statis secara matematis dinyatakan sebagai :

$$C_q = \frac{T_{\text{static}}}{T_{\text{wind}}} \quad (2.10)$$

$$C_q = \frac{T_{\text{static}}}{\frac{1}{4} \rho \cdot A_s \cdot d \cdot v^2} \quad (2.5)$$

Dimana :

T_{Static} = Torsi pada posisi benda diam (Nm)

Sedangkan torsi dinamik merupakan torsi yang digunakan benda untuk melakukan rotasi. Torsi dinamik atau torsi aktual dapat diukur dengan cara menghubungkan putaran turbin langsung dengan torsi meter. Torsi dinamik dapat dihitung dari :

$$T = I \cdot \alpha \quad (2.6)$$

Dimana :

I = Inersia *wind turbine* (kg.m²)

α = percepatan sudut *wind turbine* (rad/s²)

d. Momen inersia *Savonius*

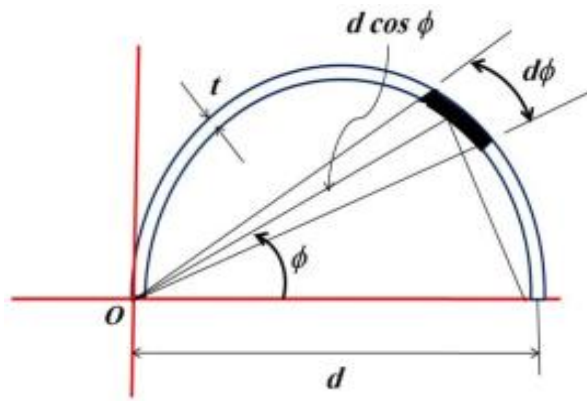
Momen inersia merupakan besarnya suatu torsi yang diperlukan untuk menggerakkan benda dengan bentuk dan arah gaya tertentu. Besarnya inersia yang diperlukan pada arak antara gaya dengan pusat massa benda. Sangat penting untuk mengetahui nilai momen inersia awal (I_0) pada benda yang bergerak bebas. Karena momen inersia akan

mempengaruhi perubahan kecepatan sudut pada benda. Momen Untuk mendapatkan inersia awal pada sudu dapat dicari melalui persamaan berikut ini :

$$dI = r^2 \cdot dm \quad (2.13)$$

$$I_b = \int r^2 \cdot dm \quad (2.7)$$

Untuk bentuk sudu dengan sudut lengkung \emptyset , persamaan momen inersia dapat didekati dengan integral dari sudut putar. Persamaan momen inersia untuk 1 sudu *Savonius* menjadi :



Gambar 2. 5 Luasan dengan pendekatan integral sudut rotor (Ali,2013).

Dimana untuk nilai

$$dm = \rho \cdot H \cdot t \cdot d \cdot \cos \emptyset \, d\emptyset \quad (2.8)$$

$$r^2 = (d \cdot \cos \emptyset)^2 \quad (2.9)$$

Sehingga bila persamaan 2.8 dan 2.9 disubstitusikan pada persamaan 2.7 maka persamaannya menjadi :

$$I_{1b} = \int (d \cdot \cos \emptyset)^2 \cdot \rho \cdot H \cdot t \cdot d \cdot \cos \emptyset \, d\emptyset \quad (2.10)$$

$$I_{1b} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho \cdot H \cdot t \cdot d \cdot (d \cdot \cos \emptyset)^2 \cdot \cos \emptyset \, d\emptyset$$

$$I_{1b} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho \cdot H \cdot t \cdot d^3 \cdot (\cos \emptyset)^3 \, d\emptyset$$

$$I_{1b} = \rho \cdot H \cdot t \cdot d^3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\cos \emptyset)^3 \, d\emptyset$$

Untuk massa benda dapat dijabarkan sebagai

$$m = \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot H \cdot t \cdot d \quad (2.12)$$

Sehingga apabila persamaan 2.12 di substitusi ke 2.11 akan menjadi

$$I_{1b} = \frac{2}{\pi} \cdot m \cdot d^2 \int_0^{\pi} (\cos \phi)^3 d\phi$$

$$I_{1b} = \frac{2}{\pi} m \cdot d^2 \left(\sin \phi - \frac{(\sin \phi)^3}{3} \right) \Big|_0^{\pi}$$

$$I_{1b} = \frac{2}{\pi} m \cdot d^2 \left(1 - \frac{1}{3} \right)$$

$$I_{1b} = \frac{4}{3\pi} m \cdot d^2$$

Sedangkan untuk 3 sudu persamaan inersia awalnya menjadi :

$$I_{3b} = \frac{4}{\pi} m \cdot d^2 \quad (2.14)$$

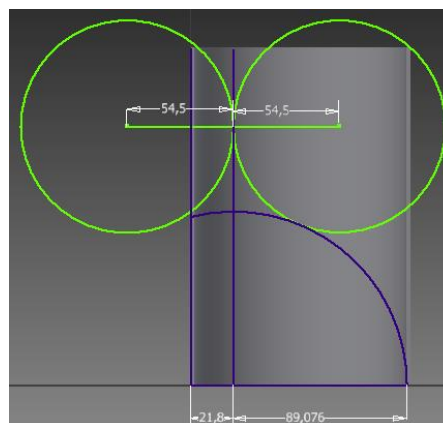
Dimana :

I_b = inersia *blade Savonius* (kg.m²)

t = tebal *blade* (m)

e. Momen inersia *Icewind turbin*

Icewind turbin merupakan pengembangan dari turbin *Savonius*. Pembuatan *Icewind turbin* didasarkan pada dimensi *Savonius* yang dipotong pada bagian tertentu. Pada penelitian ini sudu *Icewind turbin* dibuat dari sudu *Savonius* yang dipotong dengan beberapa bagian lingkaran. Inersia dan massanya dapat dicari dengan menggunakan pengurangan integral sudu *Savonius* dan integral persamaan lingkaran pemotong tersebut.



Gambar 2. 6 Pembuatan geometri *Icewind turbine*.

Pada *software Inventor Autodesk Professional 2014* terdapat menu *iProperties* yang dapat digunakan untuk mencari nilai massa dan inersia secara otomatis. Error yang didapatkan dari penggunaan menu *iProperties* pada turbin *Savonius* sekitar 0.5% untuk luas dan 7% untuk massa dibandingkan dengan perhitungan. Sehingga penggunaan menu ini dapat digunakan untuk mencari nilai momen inersia dan massa pada bentuk kompleks *Icewind* turbin .

f. Courant–Friedrichs–Lewy (CFL)

Persamaan differensial parsial yang digunakan penelitian numerik bergantung pada persamaan konveksi termasuk jarak dan waktu. Untuk mendapatkan solusi yang stabilan dan konvergensi diperlukan perlukan perhitungan nilai Courant–Friedrichs–Lewy (CFL). Nilai maksimum CFL untuk simulasi dinamis dan integral implicit euler adalah 5.

$$C = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq C_{max} \quad (2.14)$$

Dimana :

C = courant number

C_{max} = courant number maksimum yang sarankan

Δ t = time step (s)

Δ x = interval lengt (m)

2.4 Penelitian Eksperimen Turbin *Savonius*

Turbin *Savonius* lebih banyak dipilih untuk digunakan meskipun memiliki efisiensi yang rendah dibanding *Darrieus*. Hal ini dikarenakan *Savonius* menangkap dengan segala arah angin, dapat berputar pada kecepatan rendah dan dapat melakukan *self starting*. Peningkatan kinerja turbin *Savonius* dapat dilakukan dengan berbagai cara diantaranya adalah :

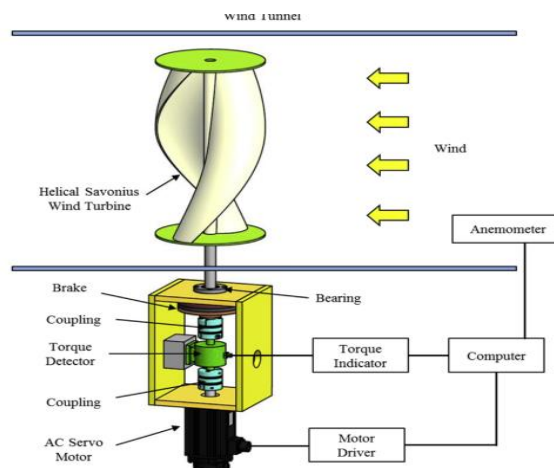
Tabel 2. 1 Penelitian eksperimen turbin *Savonius*

Peneliti	Variasi	Hasil
Mao dan Tian (2015)	Blade arch angle	Blade arch angle terbaik untuk turbin <i>Savonius</i> sebesar 160° dan 170°

Gupta et al (2012)	<i>Helical blade</i>	Bentuk sudu <i>helical</i> lebih baik dibanding sudu lurus
Saha et al (2008)	Jumlah <i>stage</i>	Turbin <i>Savonius</i> dengan 2 <i>stage</i> memiliki optimasi terbaik
	Jumlah sudu	Jumlah sudu lebih dari 2 dapat meningkatkan putaran turbin dan menurunkan torsi
Mahmoud et al (2010)	<i>Aspect ratio</i>	Semakin tinggi nilai <i>aspect ratio</i> dapat meningkatkan performa sudu, akibat meningkatnya luasan daerah tekan
	<i>Overlap</i>	Adanya gap antara sudu <i>Savonius</i> dapat menurunkan tekanan udara yang mendorong sudu.
Alexander dan Holownia (1978)	<i>Endplate</i>	Pemasangan <i>endplate</i> dikedua ujung turbin dapat meningkatkan efisiensi dari 9.2% menjadi 13.7%.
	Shroud	Pemasangan <i>shroud</i> (pengarah aliran) pada turbin dapat meningkatkan efisiensi hingga 19.3%.
Jeon et al (2014)	Bentuk <i>endplate</i>	Peningkatan performa sudu dapat dilakukan dengan memasang <i>endplate</i> di kedua ujungnya. <i>Endplate</i> terbaik berbentuk sirkular.

2.5 Penelitian Numerik Turbin *Savonius*

Proses simulasi turbin *Savonius* banyak dilakukan untuk mendapatkan data performa *Savonius* dengan biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan proses eksperimen. Simulasi dapat dilakukan dalam kondisi *steady* maupun *unsteady*. Pada simulasi *steady*, proses pengambilan data dilakukan saat benda diam pada sudut tertentu. Data yang didapat dari hasil simulasi *steady* berupa torsi statis, koefisien tekanan (C_p), dan koefisien torsi (C_Q) pada kondisi sudu tertentu. Data yang ditampilkan pada simulasi *steady* merupakan fungsi dari *angle of attack*. Simulasi *unsteady* dapat menyajikan perubahan data yang terkait dengan perubahan waktu. Pada simulasi *unsteady* turbin *Savonius*, beberapa peneliti yang memasukan nilai kecepatan angular yang bernilai konstan sebagai kondisi awal. Data yang ditampilkan dalam simulasi *unsteady* dinyatakan sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio* (TSR) baik terhadap kecepatan angular, momen torsi maupun momen inersia.



Gambar 2. 7 Contoh pengambilan data dengan bantuan *load brake* (Jeon *et al*, 2014).

Fungsi TSR banyak digunakan dalam sistem absis pengolahan data *wind turbin*. Hal ini dikarenakan grafik validasi data eksperimen dan numerik lebih mudah dinyatakan dalam fungsi TSR dibandingkan fungsi waktu. Perubahan putaran turbin terjadi sangat cepat sehingga mendeteksi perubahan putaran terhadap waktu. Fungsi TSR pada eksperimen didapatkan melalui proses penelitian yang dilakukan pada kecepatan *inlet* tertentu yang diatur oleh motor listrik. **Wakui (2008)** menyatakan bahwa proses penambahan beban pada saat menentukan fungsi TSR dapat menyebabkan fluktuasi *output* turbin. Dengan adanya penambahan *load*, maka akan terjadi perubahan momen inersia dan pergeseran pusat massa. Apabila hal ini terjadi dimungkinkan momen yang dihasilkan akan berbeda dengan sebenarnya. Ini berarti validasi data simulasi dengan data eksperimen dengan pembebanan atau *brake* tidak boleh dilakukan.

Torsi dan kecepatan angular yang dihasilkan turbin *Savonius* terjadi akibat kecepatan *inlet* angin memutar turbin, dengan memperhitungkan inersia awal saat keadaan diam. Nilai torsi, kecepatan angular dan momen inersia akan bertambah seiring dengan perubahan waktu, hingga mencapai kondisi *steady*. Simulasi dilakukan dengan menggunakan permodelan *fluid-solid interaction*.

Tabel 2. 2 Penelitian simulasi turbin *Savonius*

Peneliti	Pemaparan	
	Tujuan	Mengetahui pengaruh <i>overlap</i> terhadap C_p turbin
Akwa <i>et al</i> (2011)	Metode	<i>Finite Volume Methode, moving region, Sliding mesh</i>

	<i>Software</i>	STAR CCM+
	Kondisi	<ul style="list-style-type: none"> • 2D <i>unsteady</i> • <i>Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)</i> • <i>Eddy Viscosity k-ω SST</i> • TSR disesuaikan dengan kecepatan <i>inlet</i> dan angular
	<i>Input</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Kecepatan <i>inlet</i> dan kecepatan angular konstan pada 1 kondisi simulasi • Nilai kecepatan disesuaikan untuk mendapatkan <i>Reynolds number</i> konstan pada 4.32×10^5
	Validasi	Sheldahl (1997) menggunakan beban
	Eror	2.26%
	Hasil	<i>Overlap</i> dapat meningkatkan C_p hingga pada titik tertentu. Namun jarak <i>overlap</i> yang terlalu besar dapat menurunkan nilai C_p . Kondisi ini disebabkan karena adanya aliran udara yang ikut mendorong <i>returning blade</i> dengan tekanan tinggi. Apabila jarak <i>overlap</i> sangat lebar maka tekanan yang muncul diantara sudu akan berkurang dan turbin akan kehilangan momentumnya.
Mao dan Tian (2015)	Tujuan	Mengetahui pengaruh <i>blade arch angle</i> pada turbin <i>Savonius</i>
	Metode	2D <i>transient</i> , <i>Sliding mesh</i>
	<i>Software</i>	ANSYS 13.0
	Kondisi	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Incompressible</i> • <i>Navier–Stokes k-ϵ RNG</i> • <i>Standart wall treatment</i> • Sudu <i>no slip condition</i>
	<i>Input</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Kecepatan <i>inlet</i> konstan 7 m/s • <i>Reynolds number</i> 4.3×10^5 • TSR 0.6 – 1.4
	Batasan	Setiap variasi disimulasikan pada 3 putaran dengan perubahan 1° setiap 1 <i>time-step</i> . Setiap <i>time-step</i> akan membutuhkan 100 iterasi dengan residual dibawah 10^{-5} .
	Validasi	Sheldahl (1997) pada $Re\ 4.32 \times 10^5$ dengan <i>load</i>
	Eror	Tidak disertakan namun <i>trendlines</i> sama
	Hasil	Penggunaan <i>blade arch angle</i> diatas 180° , dapat menurunkan koefisien <i>power</i> yang dihasilkan turbin.
	Catatan	Persamaan turbulensi <i>k-ϵ RNG</i> dipilih karena memberikan keakuratan tinggi pada simulasi objek berputar dan dapat menangkap <i>swirl effect</i> . Selain itu model <i>k-ϵ RNG</i> mampu menghitung <i>effective viscosity</i> yang timbul pada <i>Reynolds number</i> rendah. Penggunaan <i>standart wall treatment</i> dapat meningkatkan keakuratan perhitungan <i>k-ϵ RNG</i> .
Nasef et al (2013)	Proses	Nasef et al menggunakan turbin baru sehingga tidak memiliki data acuan untuk proses validasi. Proses validasi metode perlu dilakukan terlebih dahulu. Awalnya

		dilakukan proses simulasi 2D <i>steady</i> turbin <i>Savonius Fujisima dan Hayashi</i> . Kemudian model turbin disimulasikan dengan metode yang sama. Selanjutnya dilakukan proses eksperimen yang divalidasi dengan data simulasi statik. Data 3D yang diambil dari eksperimen akan digunakan sebagai acuan simulasi <i>unsteady</i>
	Tujuan	Mengetahui pengaruh model model turbulensi, <i>Reynolds number</i> , <i>overlap</i> dan diameter rotor pada turbin <i>Savonius</i> .
	Metode	<ul style="list-style-type: none"> • 2D <i>steady</i> pada <i>angle of attack</i> 0 – 180° • Eksperimen • 2D <i>unsteady</i> , <i>Sliding mesh</i>
	Software	<i>Gambit 2.3.16 dan Fluent 6.3.26</i>
	Kondisi	<ul style="list-style-type: none"> • Penelitian <i>steady</i> dengan variasi model pada kondisi simulasi <i>steady standart k-ε</i>, <i>RNG k-ε</i>, <i>realizable k-ε</i> dan <i>SST k-ω</i> dengan model Fujisima dan Hayashi • Penelitian <i>unsteady</i> dilakukan pada rentang $0.2 < \lambda < 1.4$ pada kondisi 2D. Proses vsi model turbulensi <i>standart k-ε</i>, <i>RNG k-ε</i>, <i>realizable k-ε</i> dan <i>SST k-ω</i> dibandingkan dengan penelitian Fujisima
	Input	<ul style="list-style-type: none"> • Kecepatan <i>inlet</i> konstan 6 m/s • Kecepatan angular diatur konstan untuk mendapatkan kondisi TSR 0.2 – 1.4 • <i>Boundary pressure outlet</i>
	Eror	Memiliki <i>trendline</i> yang sama pada setiap validasi
	Hasil	Hasil penelitian awal menyebutkan bahwa model turbulensi terbaik untuk simulasi turbin <i>Savonius</i> adalah <i>SST k-ω</i> .
Shaheen <i>et al</i> (2015)	Tujuan	Mengetahui Pengaruh suatu <i>cluster</i> pada suatu susunan turbin <i>Savonius</i>
	Metode	<ul style="list-style-type: none"> • 2-D <i>steady</i> pada <i>angle of attack</i> 0 – 180° • 2-D <i>unsteady</i> dengan <i>Sliding mesh</i>
	Software	<i>ANSYS 14.5 workbench multiphysics platform</i>
	Kondisi	Penelitian <i>steady</i> dengan variasi model pada kondisi simulasi <i>steady transition SST</i> , <i>k-ω SST</i> , dan <i>k-ε</i> dengan model Sheldahl (1997) dengan geometri penelitian Fujusiwa (1992) pada <i>angle of attack</i> 0 - 180°
	Input	<ul style="list-style-type: none"> • Kecepatan <i>inlet</i> konstan 7 m/s • Intensitas turbulensi 0.1 % • Viskositas turbulensi 10 • <i>Mesh</i> didekat turbin <i>unstructured triangular</i> sedang <i>mesh</i> disekitarnya <i>quadrangular</i>
	Eror	• Memiliki <i>trendline</i> yang sama pada setiap validasi
	Batasan	• Setiap <i>time-step</i> pada simulasi menyatakan perubahan 1° pada turbin dengan 200 iterasi/ <i>step</i> . Kriteria konvergensi tercapai saat nilai residual maksimum mencapai 10 ⁻⁶ .

	Hasil	<ul style="list-style-type: none"> • Hasil validasi menyatakan bahwa model turbulensi <i>transition SST</i> dan <i>k-ω SST</i> menghasilkan data yang mendekati nilai eksperimen Sheldahl (1997) pada penelitian <i>steady</i>. • Kecepatan angular yang digunakan untuk mencari nilai TSR dicari dari simulasi <i>steady</i> yang dilakukan sebelumnya. Namun data kecepatan angular tidak dicantumkan.
	Catatan	Penggunaan <i>parallel computing</i> mengurangi waktu hingga 70%.
Al-Faruk et al (2012)	Tujuan	Pengaruh penggunaa sistem penggunaan beban pada turbin <i>Savonius</i>
	Metode	<ul style="list-style-type: none"> • Metode <i>rigid body solver</i> • <i>Sliding mesh</i> model 1 DOF
	Software	ANSYS CFX
	Kondisi	<ul style="list-style-type: none"> • Penelitian dilakukan pada kondisi 3D <i>unsteady</i> hingga mencapai titik optimum • Pembebanan yang disebutkan dalam simulasi ini adalah pengaruh gravitasi dan gaya eksternal (<i>load</i>) terhadap turbin. • Turbin konvensional merupakan turbin <i>Savonius</i> yang digunakan pada penelitian Altan (2008). • Sedangkan turbin baru pada penelitian ini adalah turbin yang dimodifikasi pada bagian <i>endplate</i>.
	Input	<ul style="list-style-type: none"> • Fluida <i>inlet</i> mengalir pada suhu 100°C • Kecepatan aliran <i>inlet</i> konstan 6 m/s • <i>Load</i> yang diberikan 5 Nm berlawanan dengan arah putaran
	Error	-
	Hasil	Pada turbin <i>Savonius</i> tanpa pembebanan kondisi <i>steady</i> terjadi lebih cepat pada 100 s dengan kecepatan angular 28 rad/s. Sedangkan pada saat diberi beban turbin mencapai kondisi <i>steady</i> pada waktu 150s dengan kecepatan 19 rad/s.
Al-Faruk et al (2017)	Tujuan	Mengetahui pergerakan aliran udara panas pada area <i>overlap</i> turbin <i>Savonius</i>
	Metode	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Unsteady swirling Savonius turbine</i> • metode <i>Rigid body solver</i> • <i>Sliding Mesh Model (SMM)1-DOF</i> • <i>Fluid-structure interaction</i>
	Software	ANSYS
	Kondisi	<ul style="list-style-type: none"> • Proses validasi dilakukan dengan data <i>steady</i> pada kecepatan sudu tertentu • Simulasi dilakuakan dengan kondisi <i>unsteady</i> pada kecepatan angular dan torsi awal 0. • Model turbulensi yang digunakan <i>SST k-ω</i>

	<i>Input</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Kecepatan <i>inlet</i> 5 m/s konstan • <i>Time-step</i> 0.005 – 0.006 s • Intensitas turbulensi 5%
	Eror	Eror data yang dapat dari validasi sekitar 4.7%.
	Hasil	Penggunaan turbin model baru dengan fluida panas dapat meningkatkan nilai C_P himgga 25% pada turbin baru

Proses simulasi harus dilakukan semirip mungkin dengan kondisi eksperimen di dalam *windtunnel* untuk memperkecil kemungkina eror. Salah satu langkah yang harus dilakukan adalah dengan tidak memberikan kecepatan sudut konstan dan pembebanan terhadap turbin *Savonius*. Turbin hanya berputar apabila ada angin yang bertiup dengan kecepatan tertentu dari *inlet windtunnel*. Apabila simulasi diberi *input* kecepatan sudut konstan, maka hasil simulasi numerik dimungkinkan dapat memberikan hasil yang tidak sesuai dengan kondisi aktual. Validasi yang dilakukan terhadap simulasi numerik *unsteady* dibandingkan dengan eksperimen yang diambil tanpa penentuan nilai kecepatan angular diawal.

2.6 Eksperimen *Icewind turbin*

Penelitian yang dilakukan **Aymane (2017)** tentang *Icewind turbine* dilakukan secara numerik dan eksperimen. Penelitian numerik dilakukan secara 2 dan 3 dimensi dalam kondisi statis. Hasil simulasi numerik dinyatakan dalam perubahan tekanan akibat sudut *angle of attack* sudu. Sedangkan penelitian eksperimen dilakukan tanpa menggunakan pembebanan. Kecepatan yang digunakan pada penelitian tersebut adalah 2, 4, dan 6 m/s. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan anemometer. Penelitian dilakukan pada ruang terbuka untuk mendapatkan hasil yang mendekati kondisi lingkungan.

Pada penelitian **Aymane (2017)** turbin memiliki 3 buah sudu. Data yang didapat berupa nilai C_P , C_Q dan kecepatan angular (rpm) dari *Icewind turbin* dan turbin *Savonius* biasa (*barrel*). Hasil eksperimen menunjukan bahwa performa *Icewind turbin* lebih tinggi apabila dibandingkan dengan turbin biasa. Kecepatan angular yang dihasilkan oleh *Icewind turbin* lebih rendah apabila dibandingkan dengan *barrel*. Namun nilai C_Q dan C_P yang dihasilkan oleh *Icewind turbin* rata-rata lebih besar 4% dan 7.5% dibanding dengan *Savonius* biasa.



Gambar 2. 8 Eksperimen *Icewind turbin* Aymane (2017).

Tabel 2. 3 Hasil penelitian *Icewind turbin* Aymane (2017)

Velocity	Angular Velocity (rpm)		C _Q		C _P	
	<i>Icewind</i>	<i>barrel</i>	<i>Icewind</i>	<i>Barrel</i>	<i>Icewind</i>	<i>Barrel</i>
2	23.85	16.84	0.11	0.04	0.3636	0.0834
3	37.88	43.60	0.29	0.25	0.4317	0.4295
4	41.10	50.85	0.34	0.34	0.2326	0.2873
Rata-rata	34.28	37.1	0.25	0.21	0.3426	0.2667
Selisih	-2.82		0.04		0.0759	

Data dan penelitian mengenai karakteristik *Icewind turbin* masih sangat terbatas. Dengan menggunakan metode simulasi *unsteady*, diharapkan fenomena aliran yang terjadi di sekitar turbin dapat dijabarkan dengan baik. Selain itu diharapkan hasil yang didapat akan mendekati nilai eksperimen lapangan.

2.7 Fluid Structure Interaction

Fluid structure interaction merupakan persamaan diskritisasi yang meninjau interaksi antara struktur benda dengan fluida yang berada di sekitarnya. Interaksi yang terjadi dapat berupa perpindahan ataupun deformasi pada struktur. Pengaruh interaksi antara struktur solid dengan fluida disekitarnya dapat menimbulkan kondisi stabil maupun osilasi pada benda. Gerakan dinamis struktur dapat diakibatkan oleh persamaan gerakan fluida ataupun gaya eksternal (Agamloh *et al*,2007).

Model persamaan interaksi fluida yang paling dasar meliputi hukum konservasi massa, energi, momentum dan kecepatan angular pada volume tertutup. Persamaan ini lebih dikenal dengan *Navier–Stokes equations*. Fluktuasi yang terjadi pada struktur bergantung pada turbulensi aliran yang berhubungan dengan bentuk laluan dan waktu. Persamaan diatas merupakan persamaan FSI pada diskritisasi *continuum level*.

Model turbulensi yang sering dipakai dalam penelitian *rotating wind turbine* adalah *k- ω SST* dan *k- ϵ* . Penggunaan model turbulensi *k- ϵ* menunjukan hasil yang baik untuk simulasi yang menunjukan ingin menunjukan hasil berupa vorteks. Sedangkan *k- ω* menunjukan hasil yang baik untuk mengestimasi fenomena yang terjadi disekitar aliran (Tahani,2007). Selain itu *k- ω SST* banyak direkomendasikan oleh peneliti karena menunjukan hasil yang sama baik di area turbulen maupun transisi.

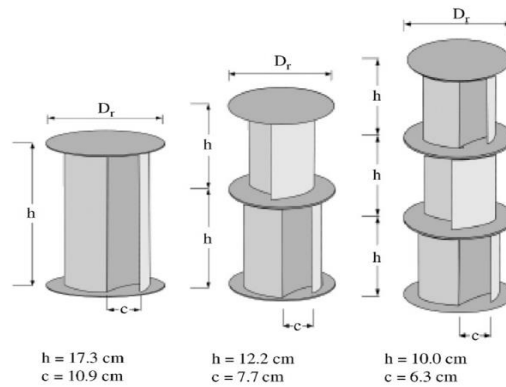
2.8 Sliding Mesh

Pada turbin yang berputar terdapat *mesh* yang ikut berotasi diatas *mesh* lain yang diam. *Sliding mesh* disebut dengan *Dinamic Body Fluid Interaction* (DBFI) pada program software numerik komersial. DBFI merupakan simulasi *rigid body* yang bergerak sebagai respon terhadap perubahan tekanan dan gaya gesek pada fluida disekitarnya. Gaya eksternal lain juga diperhitungkan dalam simulasi ini. Gerakan fluida dapat berupa gerakan rotasi dan translasi.

Pada software numerik komersial ini, pemilihan sumbu arah gerak dapat dilakukan pada 6 arah (*6 degree of freedom*). Benda yang berotasi dibuat sebagai geometri yang melayang dan diselimuti silinder ataupun bola. Pada kondisi ini benda harus memiliki pusat massa dan inersia. Selain itu terdapat *interface* berupa *overset mesh* diantara benda dengan daerah sekitarnya.

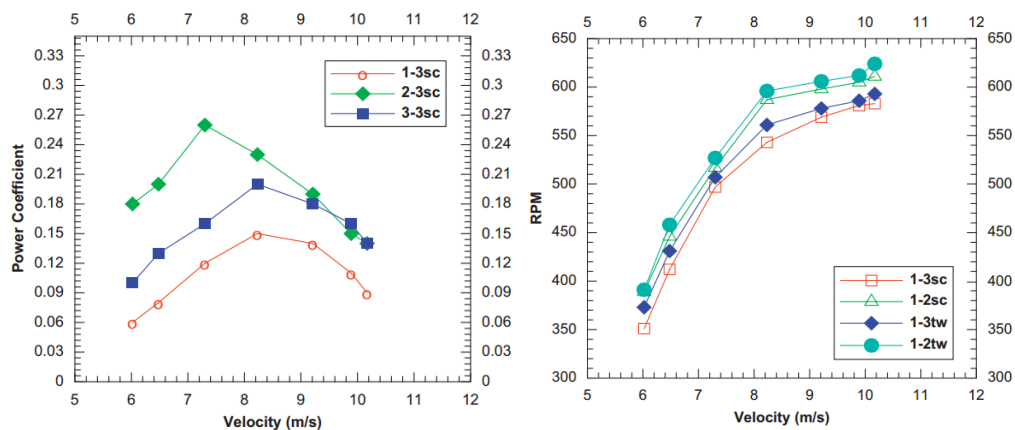
2.9 Data Acuan Validasi

Penelitian akan divalidasi dengan data eksperimen yang dilakukan **Saha(2008)** pada turbin *Savonius* dengan 3 *blade*. Eksperimen yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah *blade* dan *stage* pada performa turbin *Savonius*. Selain itu bentuk *blade* juga divariasikan pada kondisi *straight* dan *twisted*.



Gambar 2. 9 Bentuk *stage* dan dimensi pada eksperimen Saha (2008).

Pada penelitian ini jumlah variasi *blade* adalah 2 dan 3 buah. Sedangkan *stage* turbin divariasikan hingga 3 tingkat pada nilai D/H yang sama. Data yang diambil adalah kecepatan angular dan C_p sebagai fungsi dari kecepatan *inlet*. Nilai kecepatan angular diambil dengan menggunakan digital *tachometer*. Sedangkan nilai C_p didapat dari penggunaan *brake dynamometer*. Data acuan yang akan dipakai pada simulasi ini adalah turbin 1 *stage* dengan 3 sudu lurus.



Gambar 2. 10 Hasil eksperimen (a) *velocity inlet*- C_p (b) *velocity inlet*- *velocity* angular pada penelitian Saha(2008).

Hasil simulasi **Saha (2008)** pada gambar 2.9 menampilkan nilai C_p dan kecepatan angular terhadap fungsi kecepatan *inlet*. Turbin yang diuji merupakan memiliki variasi bentuk *straight* (sc) dan *twisted* (tw) pada kondisi 1 *stage*. Variasi jumlah sudu yang digunakan sebanyak 2 dan 3 sudu. Pada gambar 2.9 kode 1-3sc diartikan sebagai turbin *Savonius straight* 1 *stage* dengan 2 sudu. Nilai

C_p dan kecepatan angular 1-3sc akan digunakan sebagai data validasi pada penelitian ini.

Penelitian ini akan mensimulasikan turbin *Savonius* yang digunakan pada eksperimen **Saha(2008)** sebagai acuan validasi metode. Kecepatan *inlet* yang digunakan berada pada range 4 – 10 m/s. Validasi akan dilakukan dengan menggunakan data C_p dan kecepatan angular pada setiap perubahan kecepatan aliran *inlet*.

BAB III

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Komputasi Jurusan Teknik Mesin FTI – ITS Surabaya. Penelitian dilakukan dengan metode simulasi numerik. Proses penelitian dilakukan dengan menggunakan *software Inventor Autodesk Professional 2014* dan *Software numerik komersial*. Secara umum terdapat tiga tahapan utama yang perlu dilakukan dalam metode numerik, antara lain: *Pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

Model penelitian berupa turbin *Savonius* tipe-S 3 blade dengan *endplate*. Kemudian penelitian dilanjutkan dengan model berupa *Savonius* tanpa *endplate* dan *Icewind turbine* 3 blade. Fluida kerja yang mengalir adalah udara dengan kecepatan *inlet* bervariasi antara 2 - 10 m/s. Proses simulasi akan dilakukan dengan kondisi *steady*, *unsteady rotating constant* dan *unsteady* 1 DOF.

3.1 Pre-processing

Pada tahap *pre-processing* terdapat beberapa langkah yang dilakukan, yaitu: pembuatan model benda uji, pembuatan *meshing* pada domain, penentuan kondisi batas dan parameter-parameter yang telah ditentukan.

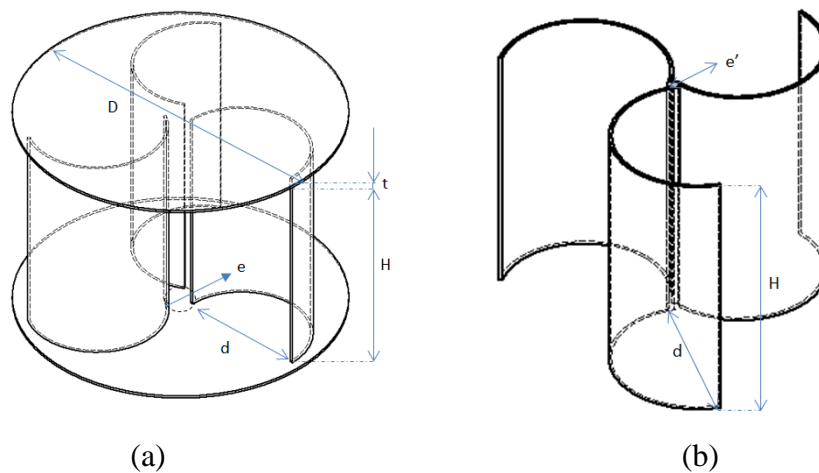
3.1.1 Model Benda Uji

Terdapat 3 buah model benda uji yang akan dipakai dalam penelitian ini, yaitu : *Savonius wind turbine* dengan dan tanpa *endplate*, serta *Icewind turbine*. Ketiga model benda uji merupakan memiliki 3 sudu dengan *angle blade arch* 180°. Pada penelitian ini turbin *Savonius* yang memiliki *endplate*, terdapat *overlap* diantara sambungan sudu. Sedangkan untuk *Icewind turbin* dan *Savonius* tanpa *endplate*, keduanya tidak memiliki *connecting rod* diantara sudunya namun tidak memiliki *endplate*. Proses pembuatan model benda uji dilakukan dengan menggunakan *software Autodesk Inventor Professional 2014*.

Benda uji yang digunakan sebagai validasi memiliki dimensi dan bentuk sama seperti benda uji pada penelitian **Saha(2008)**. Spesifikasi dimensi benda uji seperti yang tertera pada tabel 3.1. Pada penelitian **Saha(2008)** juga tertera bahan turbin *Savonius* dengan *endplate*. Pada turbin ini, *endplate* diasumsikan terbuat

dari material yang sama dengan sudu. Material yang digunakan adalah *galvanized iron* dengan $\rho = 7870 \text{ kg/m}^3$. *Endplate* terdiri dari 2 plat untuk turbin *Savonius* dan 1 plat untuk *Icewind* turbin. Berat *Savonius* dapat melalui penjumlahan berat sudu dan *endplate* melalui persamaan 2.19. Momen inersia awal dapat dicari secara matematis dengan persamaan 2.22.

Turbin *Savonius* tanpa *endplate* memiliki ukuran yang sama seperti *Savonius* dengan *endplate*. Namun turbin *Savonius* tanpa *endplate* tidak memiliki *overlap*. Turbin ini dilengkapi dengan *connecting rod* dengan ketebalan 2 mm.



Gambar 3. 1 Material uji turbin *Savonius* (a) dengan *endplate* (b) tanpa *endplate*

Tabel 3. 1 Dimensi benda uji Turbin Savonius dengan endplate Saha(2008)

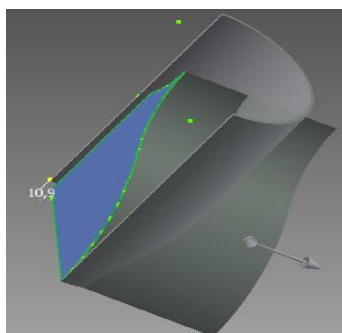
<i>Nama</i>	Saha et al (2008)	<i>Satuan</i>
<i>Overlap (e / d)</i>	0.15	-
<i>Aspect ratio (d / H)</i>	1.58	-
<i>End plate (D / d)</i>	1.1	-
<i>Blade diameter (d)</i>	109	mm
<i>Rotor height (H)</i>	173	mm
<i>Blade thickness</i>	2	mm
<i>End plate thickness</i>	2	mm

Geometri *Icewind* turbin yang digunakan pada penelitian ini memiliki dimensi yang hampir sama dengan penelitian **Saha(2008)**. *Icewind* turbin yang dibuat merupakan turbin straight *Savonius* biasa yang dipotong dengan proyeksi

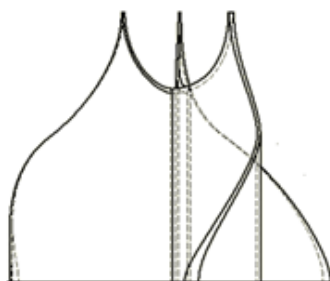
bidang. Pada dasarnya bidang terpotong terdiri dari sebuah persegi panjang yang memiliki ukuran panjang dan lebar sesuai dengan D/H turbin. Kemudian persegi panjang tersebut dipotong dengan menggunakan 3 buah lingkaran. Bidang tersebut kemudian diproyeksikan dalam turbin *straight Savonius* 3D. Luas area *Icewind turbin* akan di perbesar dengan besar tertentu agar memiliki luasan yang sama dengan turbin *Savonius*.

Tabel 3. 2 Perbandingan Dimensi Turbin

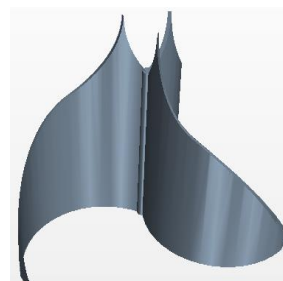
Bagian	Savonius dengan endplate	Savonius tanpa endplate	Icewind
<i>Overlap (e / d)</i>	0.15	-	-
<i>Blade diameter (d)</i>	109	109	180.32
<i>Rotor height (H)</i>	173	173	271.26
<i>Blade thickness</i>	2	2	2
<i>End plate thickness</i>	2	2	2
<i>Frontal Area</i>	0.0377	0.0377	0.0377



(a)



(b)



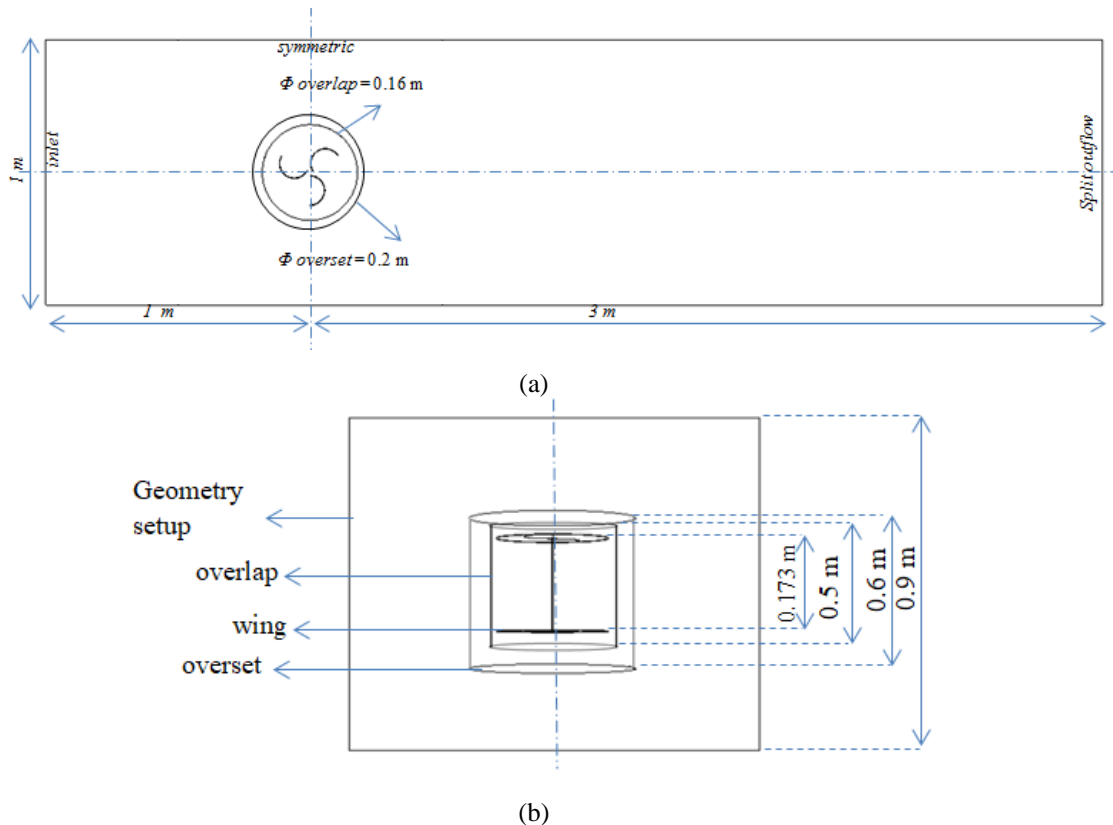
(c)

Gambar 3. 2 (a) Bidang yang diproyeksikan ke *Savonius* turbin (b) *Icewind turbin* hasil *extrude cut* tampak depan (b) tampak atas.

3.1.2 Domain Simulasi dan *Boundary condition*

Benda uji yang telah selesai dibuat akan diekspor ke dalam program Software numerik komersial. Setelah benda uji berhasil dimasukkan kedalam program Software numerik komersial, maka akan dibuat bodi tambahan yang akan masuk kedalam domain simulasi. Bodi tambahan yang dibuat berupa balok dan silinder dengan dimensi seperti yang tertera pada gambar 3.2. Balok *test section* yang terdiri dari balok I, II dan III dinyatakan sebagai bodi statis yang tidak bergerak. Sedangkan bodi pembantu berupa silinder akan digunakan sebagai bagian *overset* yang berputar. Selain penambahan bodi pada simulasi ini juga ditambahkan *part overlap* berupa silinder yang memiliki ukuran lebih kecil dibanding ukuran bodi silinder. Fungsi dari *part* ini sebagai *volumetric control* terhadap *overset mesh*.

Sisi yang mengalami kontak antara daerah I, II dan III merupakan *interface* yang didefinisikan sebagai *internal interface*. Sisi sekeliling *test section* dinyatakan sebagai bagian *symmetric*. *Inlet* simulasi dinyatakan sebagai *velocity inlet*. Sedangkan outflow aliran dinyatakan sebagai *split outflow*.



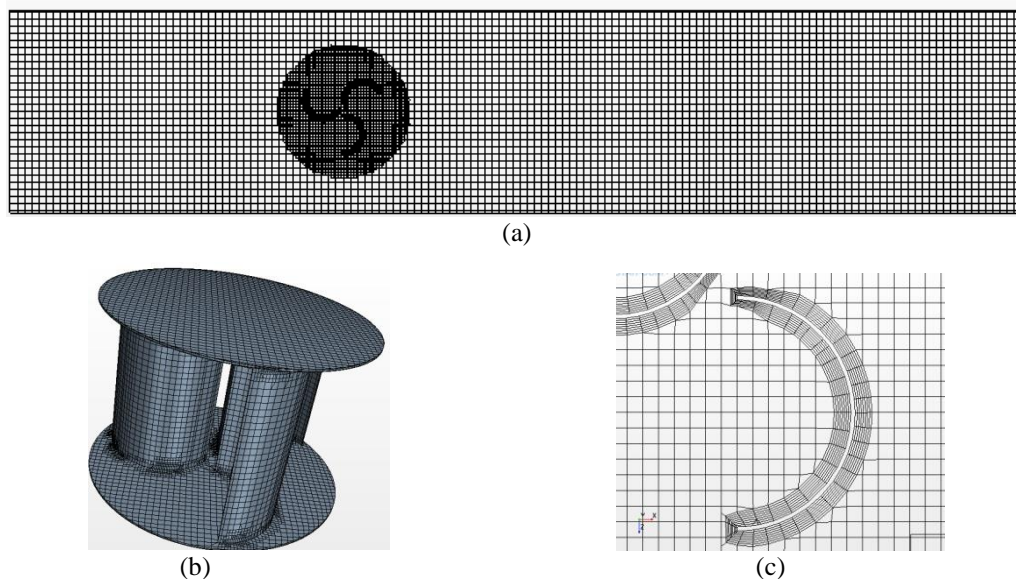
Gambar 3. 3 *Boundary condition* dan ukuran *test section* (a) tampak atas (b) tampak samping

3.1.3 Meshing

Meshing disebut juga sebagai diskritisasi merupakan pembagian daerah model benda uji menjadi elemen yang lebih kecil. Elemen tersebut terbentuk dari nodal yang dibuat pada model benda uji yang berfungsi sebagai batas struktur. Proses *meshing overset* turbin dalam penelitian ini dilakukan secara otomatis namun masih menentukan batas nilai terendah yang diinginkan. *Meshing* yang dibuat pada turbin memiliki *layer* di daerah dekat turbin. Jumlah *layer* akan bertambah seiring dengan kenaikan jumlah sel pada saat melakukan proses *grid independensi*. Sedangkan untuk daerah background, mesh akan dilakukan secara otomatis dengan mesh yang lebih besar. Sistem *meshing* dibagi menjadi empat *mesh continuum* yaitu :

- *Overset* turbin : tipe *mesh* yang dipilih adalah *surface remesher* dengan bentuk *trimmer*. Dengan nilai *base mesh* dan *layer* divariasikan mulai dari 0.02m dan 2. Jarak *layer* ditetapkan sebesar 33.3% dari *base mesh*. *Layer stretching* disesuaikan untuk mencapai $y^+ < 1$. Volumetric control pada *overset* turbin terdiri dari *overset* 80% dan *overlap* 40%
- Test section dengan ketentuan base mesh disesuaikan dengan jumlah mesh yang ingin di dapat. Sedangkan volumetric control relatif size bernilai 80%.

Hasil *mesh* yang diperoleh ditampilkan pada gambar 3.4.



Gambar 3. 4 *Mesh* (a) potongan penampang tengah *wind turbine* (b) turbin (c) perbesaran bagian *overset* pada jumlah sel 200.000

Pemilihan jumlah *mesh* yang teroptimum didapatkan melalui proses *grid independensi*. *Mesh* yang digunakan dalam proses *grid independensi* berkisar antara 1000000 – 1700000 pada kecepatan 10 m/s. Pada kecepatan tinggi diperlukan umlah *mesh* yang lebih rapat di daerah yang ditinjau. Di sisi lain penggunaan *mesh* yang terlalu rapat dapat menyebabkan proses simulasi menjadi lebih lama.

3.2. Processing

3.2.1 Processing steady

Hasil *mesh* yang telah dilakukan pada langkah sebelumnya akan diproses sesuai dengan permodelan yang diinginkan. Proses simulasi dilakukan pada kondisi 3-D dengan fluida kerja berupa gas. Dalam kondisi ini udara diartikan berada pada kondisi *incompressibel*. Aliran *freestream* memiliki nilai $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ dengan viskositas sebesar $1,86 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$. Kecepatan fluida kerja akan divariasikan antara 2, 4, 5, 8 dan 10 m/s. Simulasi dilakukan pada kondisi *steady*.

3.2.2 Processing unsteady

Hasil *mesh* yang telah dilakukan pada langkah sebelumnya akan diproses sesuai dengan permodelan yang diinginkan. Proses simulasi dilakukan pada kondisi 3-D dengan fluida kerja berupa gas. Secara detail berikut merupakan model penelitian yang digunakan :

a. Fluida kerja

Fluida kerja yang digunakan dalam simulasi merupakan gas atau udara bebas dengan nilai massa jenis konstan. Dalam kondisi ini udara diartikan berada pada kondisi *incompressibel*. Aliran *freestream* memiliki nilai $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ dengan viskositas sebesar $1.789 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$. Kecepatan fluida kerja akan divariasikan antara pada kecepatan 2 dan 10 m/s.

b. Waktu

Simulasi akan dilakukan pada kondisi *unsteady implicit*. Metode *implicit unsteady* merupakan langkah yang digunakan untuk mencari nilai baru suatu persamaan melalui nilai awal yang telah ada. Persamaan

implicit akan menggunakan fungsi *time-step* untuk menghasilkan suatu solusi. Kekurangan dari metode *implicit* adalah akurasi nilai yang dihasilkan rendah dan memerlukan waktu yang lama. Namun solusi yang dihasilkan lebih stabil. Aliran fluida merupakan *segregated flow*, dimana beberapa fungsi dari suatu persamaan akan dipilih satu fungsi untuk diselesaikan secara menyeluruh untuk seluruh sel. Setelah selesai baru perhitungan akan dilakukan untuk fungsi lain yang tersisa. Besarnya *time-step* yang digunakan disesuaikan dengan nilai CFL. Pada penelitian ini kondisi yang digunakan adalah *implicit second order*.

c. Model turbulensi

Pendekatan model turbulensi diperlukan untuk menentukan bagaimana proses perhitungan solusi suatu persamaan. *Reynolds-Averaged Navier-Stokes Turbulence Models* (RANS) merupakan suatu persamaan *unsteady* turbulensi. Persamaan RANS pada *Software* numerik komersial terdiri dari *Eddy viscosity models* dengan menghitung tensor aliran rata-rata dan *Reynolds stress transport models* untuk menghitung tensor tiap momentum. Penggunaan model turbulensi akan berbeda untuk setiap kasusnya. Pada penelitian *wind turbine Savonius* ini model turbulensi yang digunakan adalah turbulensi *k-omega shear stress transport (k- ω SST)*.

Tabel 3. 3 *Boundary condition* simulasi *Savonius*

<i>Bagian</i>	<i>Boundary</i>	<i>Input</i>	<i>Nilai</i>
<i>Inlet</i>	<i>Velocity inlet</i>	Kecepatan	2 dan 10 m/s
		<i>turbulent intensity</i>	4%
		<i>length scale</i>	0.01 m
<i>Outflow</i>	<i>Split outflow</i>	-	
<i>Dinding</i>	<i>Symetric</i>	-	
<i>Overset</i>	<i>Overset mesh</i>	-	
<i>Wing</i>	<i>Wall</i>	<i>motion spesification</i>	<i>DFBI rotation and translation</i>

Setelah pemilihan kondisi permodelan, pada *boundary condition* yang telah disebutkan sebelumnya akan muncul sub-menu tambahan untuk

memasukkan data spesifik. Nilai yang dimasukkan pada *boundary condition* dan parameter akan dijabarkan pada tabel 3.2.

Bagian *overset* akan berputar didalam *test section*, untuk itu hubungan keduanya di definisikan sebagai linier *overset mesh*. Spesifikasi *DFBI rotating and translation* digunakan pada benda yang bergerak terhadap 1 sumbu yaitu *rotating y axis*. Gerakan yang terjadi pada turbin *Savonius* dibatasi hanya pada *rotasi wing* dengan salah satu sumbu sebagai pusat putaran. Pada sub menu DFBI perlu dimasukkan beberapa data pendukung untuk menjalankan simulasi.

Pada simulasi yang dilakukan dengan nilai kecepatan angular konstan, menggunakan spesifikasi *rotating motion*. Kecepatan angular berada pada arah y dengan arah sumbu putar negatif (-) apabila berputar berlawanan dengan aturan tangkapanan. Data pendukung seperti berat dan momen inersia tidak digunakan pada saat simulasi kecepatan angular konstan. Pada simulasi ini nilai momen inersia dan massa didapatkan dari perhitungan yang dilakukan *software Autodesk Inventor 2014*. Data yang diperlukan berupa berat dan momen inersia dari turbin *Savonius* terlampir pada tabel 3.3.

Tabel 3. 4 *Input data*

Bagian	Boundary	Input	Nilai
Fluida	Uniform searah	ρ	1.225 kg/m ³
		μ	1.789 x 10 ⁻⁵ N.s/m ²
Inlet	Velocity inlet	Kecepatan	4 - 10 m/s
		Intensitas turbulensi	5%
		Length scale	0.01 m
Wing		Rotating	y axis
		Meterial	Galvanized Iron
		ρ	7870 kg/m ³
	Savonius dengan endplate	Massa	3.158 kg
		Momen inersia	0.036137713 kg.m ²
		d	124.355 mm
	Savonius tanpa endplate	Massa	1.473 kg
		Momen inersia	0.009263558 kg.m ²
		d	115.017 mm
	Icwind	Massa	1.01 kg
		Momen Inersia	0.0033 kg.m ²
		d	180.3235 mm

Residual minimum			10^{-5}
<i>Unsteady</i>	<i>Implicit second order</i>	<i>Time step</i>	0.1 s
		<i>Inner iteration</i>	100 iterasi /timestep
Model	<i>Segregeted flow k-ω SST</i>		

Time-step yang digunakan pada penelitian ini akan disesuaikan dengan kondisi CFL. Maksimum nilai iterasi dalam 1 *time-step* juga akan disesuaikan saat mencapai nilai residual minimum pada simulasi. Nilai minimum residual untuk mencapai konvergensi dalam penelitian ini adalah 10^{-5} .

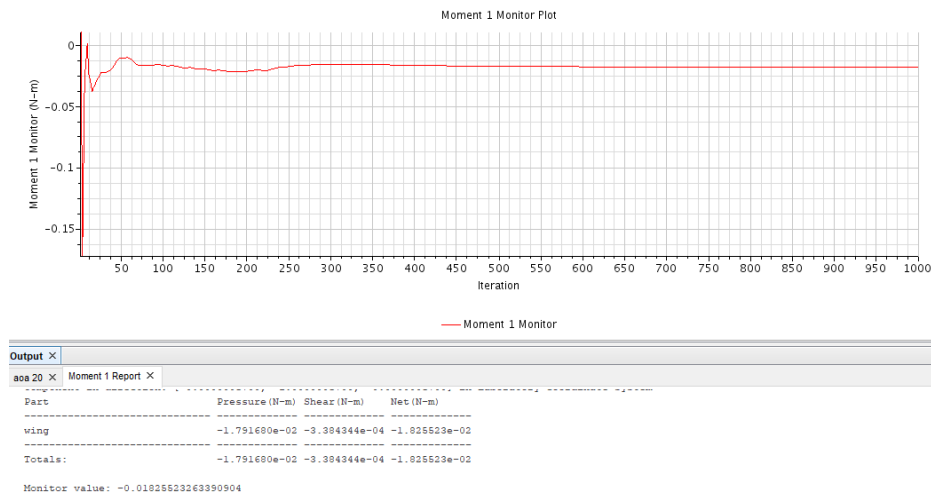
Data hasil simulasi yang diharapkan dari simulasi ini adalah nilai kecepatan angular, C_P dan C_Q putaran turbin pada kecepatan uji. Pada turbin *straight Savonius* data yang diolah akan divalidasi dengan penelitian **Saha (2008)**. Kemudian data tersebut akan di bandingkan dengan hasil simulasi *Icewind*.

3.3. Post-Processing

Hasil simulasi *steady* dan *unsteady* yang akan dibahas dalam penelitian ini meliputi data kualitatif maupun kuantitatif. Data kuantitatif yang akan diambil pada simulasi *steady* berupa momen dan y^+ , sedangkan untuk simulasi *steady* data yang diambil adalah momen dan kecepatan angular. Data kualitatif yang diambil baik simulasi *steady* maupun *unsteady* adalah sama berupa vektor kecepatan kontur *vorticity* dan *pressure* serta *pathline*.

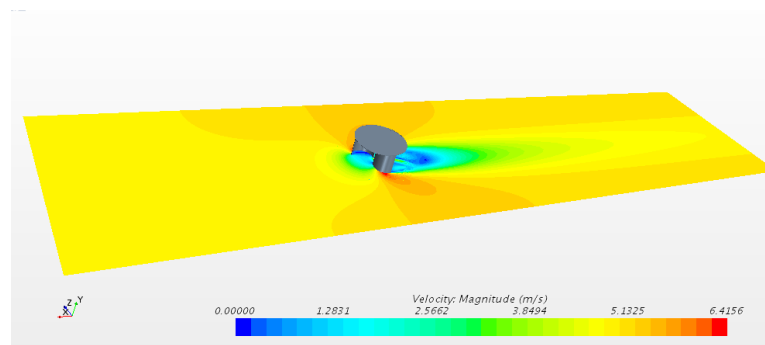
3.3.1 Post processing simulasi steady

Pengambilan data simulasi *steady* dilakukan pada data terakhir yang didapatkan dari simulasi. Pada simulasi ini nilai kuantitatif *post processing* harus diolah terlebih dahulu melalui menu *report*. Simulasi *steady* akan di running hingga mencapai minimum residual 10^{-4} atau dibatasi 1000 iterasi. Hasil simulasi *steady* yang didapat menunjukkan nilai yang cukup stabil diakhir iterasi. Nilai terakhir yang muncul dilayar akan diambil sebagai data kuantitatif baik momen, gaya maupun y^+ . Nilai yang muncul dilayar (*monitor value*) merupakan hasil penjumlahan *pressure* dan *shear stress effect*. Data kuantitatif yang didapat dapat diolah dengan tabel maupun grafik dengan *microsoft excle*. Untuk data yang memiliki lebih dari acuan 1 sumbu, pembuatan grafik dapat dilakukan dengan program *origin pro*. Hasil simulasi *steady* dapat dilihat seperti gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Hasil simulasi *steady* pada turbin *Savonius* dengan *endplate* sudut azimuth 20° .

Selain data kualitatif, simulasi *steady* juga dapat menghasilkan data kualitatif berupa vektor, kontur dan *pathline*. Untuk mendapatkan data kuantitatif, diawali dengan pembuatan midplan yaitu berupa area potongan pada ketinggian yang diinginkan. Pada simulasi ini area potongan plan dibuat pada ketinggian $0.05H$, $0.5H$ dan $0.8H$. Selanjutnya data yang ingin didapatkan akan di pilih pada bagian *screen*. Untuk mendapatkan kulitas gambar yang bagus gambar dapat disimpan dengan cara menyimpan *hardcopy* dengan perbesaran sesuai yang diinginkan. Setelah itu ggambar dapat disimpan pada ekstensi file jpg maupun png. Bentuk potongan midplan dapat dilihat seperti gambar 3.7.



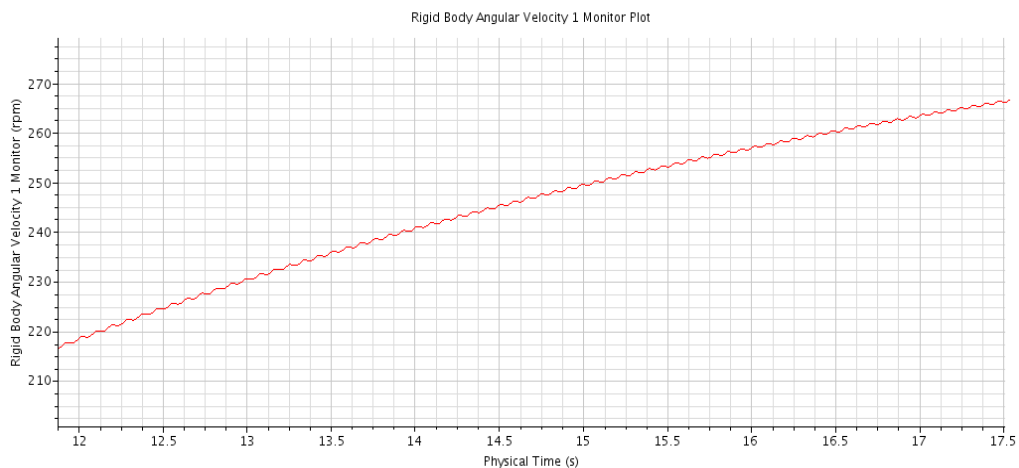
Gambar 3.7 Data kualitatif *midplan velocity contour* simulasi *steady* pada turbin *Savonius* dengan *endplate* sudut azimuth 20° .

3.3.2 Post processing simulasi *unsteady*

Pengambilan data simulasi *unsteady* dapat dilakukan pada berbagai titik yang diinginkan. Pada pennelitian ini data *unsteady* baik kualitatif maupun kuantitatif akan diambil pada titik C_p optimum dan TSR maksimum. Nilai C_p

optimum merupakan nilai dimana C_p tertinggi dihasilkan. Nilai C_p tersebut merupakan nilai rata-rata C_p satu putaran. Sedangkan nilai TSR maksimum merupakan titik terakhir dimana simulasi dihentikan.

Untuk mendapatkan data kuantitatif baik momen maupun kecepatan angular, dapat dilakukan pengaturan pada bagian *report*. Untuk simulasi FSI 1-DOF terdapat beberapa pilihan data seperti kecepatan, percepatan, momentum dan jarak dihitung secara linear dan angular. Perubahan yang perlu dilakukan hanyalah pada pengaturan sumbu putar saja. Data yang diperoleh dapat diatur sebagai fungsi waktu maupun iterasi. Contoh hasil data simulasi *unsteady* dapat dilihat pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Data kuantitatif simulasi *unsteady* pada turbin *Savonius* dengan *endplate*.

Data kuantitatif yang didapat kemudian akan diambil dengan menggunakan menu *tabulate* dan disimpan ke dalam *microsoft excle*. Data tersebut kemudian diolah menjadi grafik fungsi TSR- C_p . Grafik yang didapat akan diberikan *trendline* polinomial untuk mendapatkan rata-rata nilai dalam satu putaran.

Untuk pengaturan data kualitatif *unsteady* seperti *pathline*, kontur dan vektor dapat dilakukan dengan cara yang sama seperti data kualitatif *steady*. Simulasi FSI 1-DOF memiliki kemampuan untuk menyimpan data *post processing* dalam bentuk film yang dapat disimpan melalui menu *solution historis*. File yang tersimpan dalam bentuk *.simh* dapat diubah menjadi *movie* melalui proses perekaman screen.

3.4. Grid Independensi

Proses *grid independency* pada penelitian ini, dilakukan pada kondisi *steady* dengan menggunakan turbin *Savonius* yang dilengkapi *endplate*. Turbin *Savonius* yang digunakan memiliki sudut AOA 30°. Aliran fluida yang mengalir melalui inlet memiliki kecepatan 10 m/s. Meshing yang digunakan pada penelitian ini divariasikan pada range 1000000 – 1700000 sel. Hasil simulasi akan di tunjukan pada tabel 4.1.

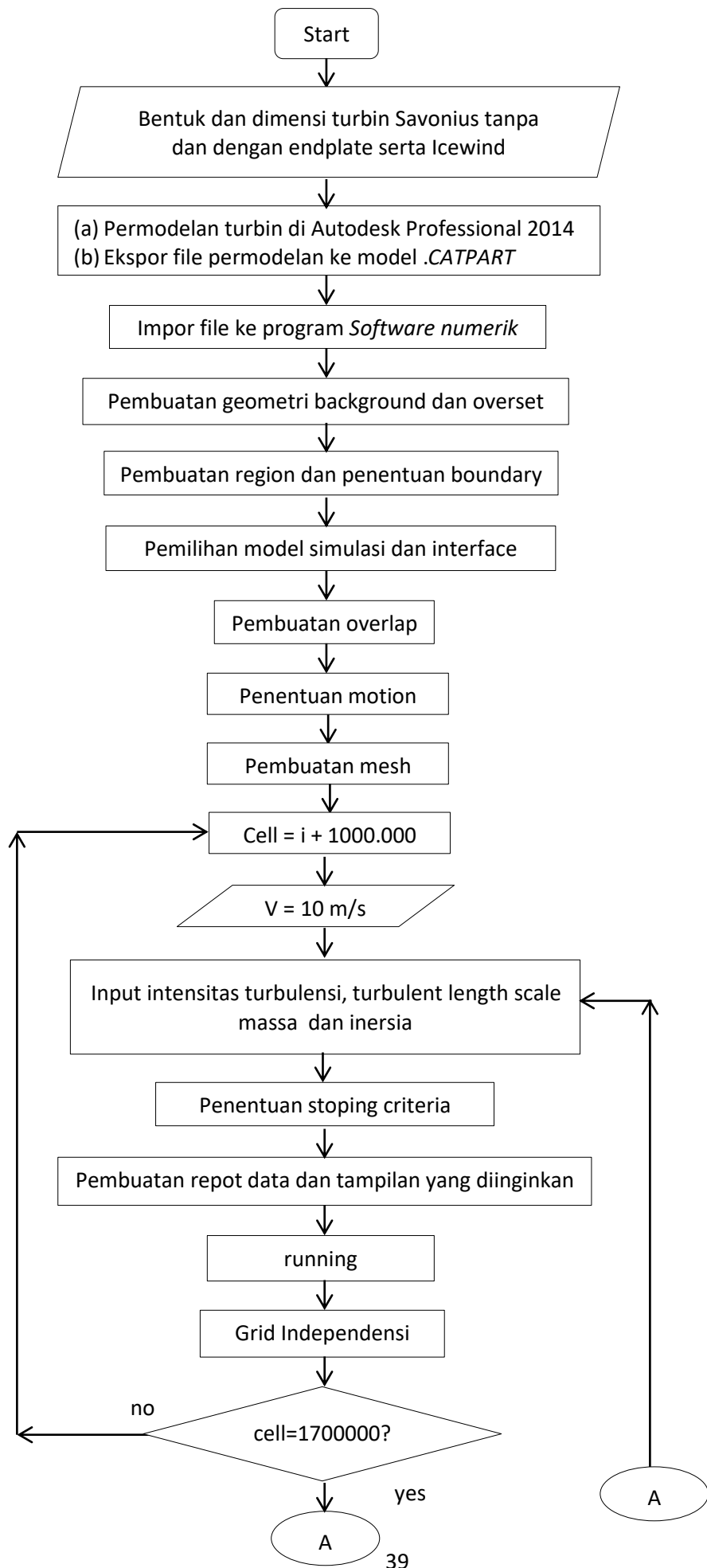
Tabel 3. 5 Grid independency

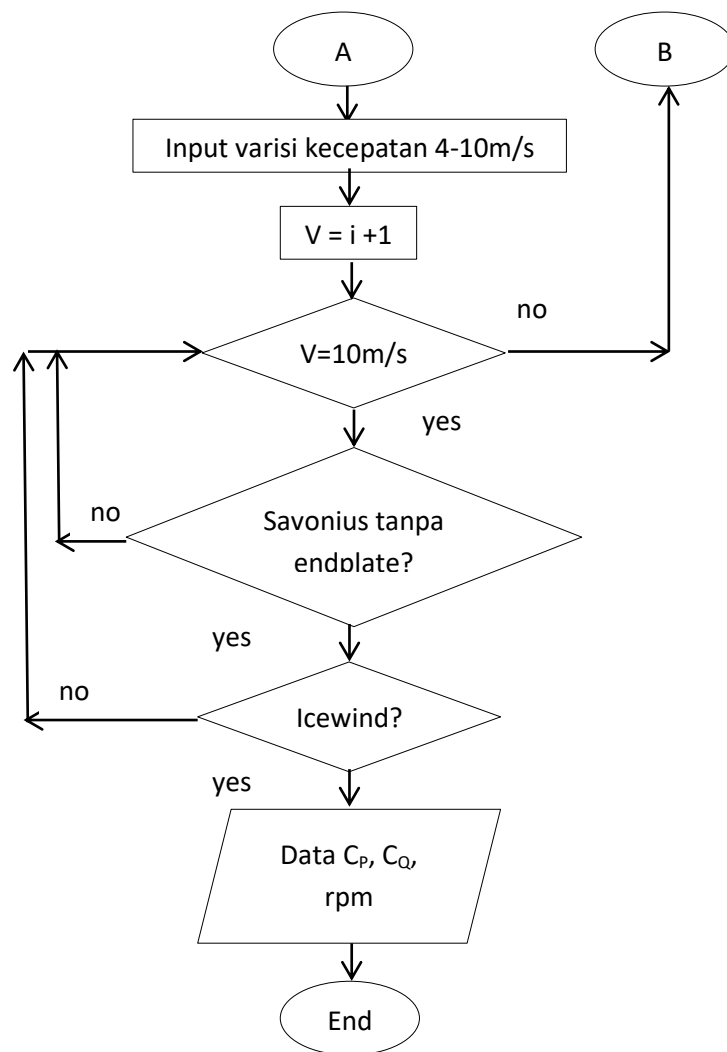
Jumlah sel	y ⁺	Momen	Eror %
631729	0.262	0.0207	-
735180	0.251	0.021954	5.68
899768	0.197	0.021621	1.54
1116522	0.267	0.02119	2.05
1296710	0.220	0.020955	1.11

Jumlah sel yang optimum pada proses grid independency adalah sebesar 1116522 sel. Jumlah sel tersebut didapatkan dari penggunaan mesh trimmer surface mesh pada base size background 0.05 m. Sedangkan overset memiliki nilai base size 0.008 m dengan menggunakan 10 layer. Nilai base size dan tipe mesh akan digunakan pada proses meshing pada turbin *Savonius* tanpa *endplate* dan *Icewind*.

3.5. Flowchat Penelitian

Berikut ini merupakan flowchat penelitian yang dilakukan.





BAB IV

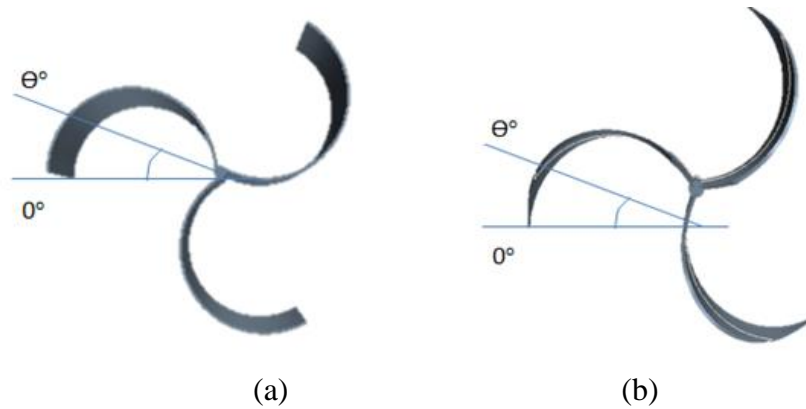
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil dari proses simulasi *wind turbine* baik dalam kondisi *steady*, *unsteady rotating constant* dan *unsteady DBFI*. Hasil simulasi yang dilakukan pada penelitian ini akan divalidasi dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh **Saha (2008)**. Simulasi diawali dengan proses *grid independesi* sel yang dilakukan secara *steady* pada sudut 30° dengan kecepatan inlet 10 m/s. Setelah mendapatkan jumlah sel yang optimum, simulasi *steady* dilanjutkan untuk turbin *Savonius* dengan *endplate*, dan tanpa *endplate* serta *Icewind* pada sudut $0 - 120^\circ$. Kemudian simulasi dilanjutkan secara *unsteady* pada kondisi *rotating constant*. Untuk melakukan simulasi *rotating constant*, diperlukan nilai kecepatan angular sebelumnya. Kecepatan rotasi konstan yang dijadikan nilai input pada simulasi pada turbin *Savonius* dengan *endplate*, didapatkan dari nilai maksimum yang didapat dari hasil simulasi **Saha (2008)**. Namun untuk simulasi turbin *Savonius* tanpa *endplate* dan *Icewind* yang belum memiliki nilai kecepatan maksimum, nilai kecepatan angular akan didapatkan pada kondisi TSR yang sama dengan TSR *Savonius* dengan *endplate*. Selanjutnya simulasi turbin akan dilakukan dengan kondisi 1-DOF dengan input massa dan momen inersia awal.

Hasil simulasi pada penelitian ini akan dibahas secara kualitatif dan kuantitatif. Data yang dapat diambil secara kuantitatif meliputi nilai C_p , C_q dan kecepatan angular turbin. Nilai kualitatif performa turbin akan disajikan dengan menggunakan grafik dan tabel. Perubahan performa turbin akibat adanya variasi pada turbin akan dijelaskan dengan bantuan data kualitatif meliputi kontur dan vektor.

Dalam pembahasan simulasi ini terdapat beberapa data yang berhubungan dengan sudut azimuth. Pengertian sudut azimuth merupakan sudut putaran dari kondisi awal disaat benda tidak bergerak. Dalam simulasi ini *Icewind* turbin merupakan turbin yang dibuat dari model awal turbin *Savonius* yang dipotong seperti kurva. Terdapat sedikit perbedaan mengenai sudut awal posisinya. Turbin *Savonius* yang berada pada posisi 0° , sudut azimuth di hitung dari gerakan

adversing blade mendatar yang berputar ke arah clockwise. Sedangkan sudut azimuth *Icewind* turbin diambil dari sudu *Savonius* posisi 0° yang terpotong kemudian akan di putar ke posisi 0° . Sehingga posisi awal *Icewind* mendatar seperti seperti *Savonius*. Bentuk sudut azimuth diunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Sudut azimuth pada (a) *Savonius* dan (b) *Icewind*

4.1. Perbandingan Metode Simulasi Turbin *Savonius Endplate*

Dalam penelitian ini simulasi akan dilakukan dengan kondisi *steady* dan *unsteady* dengan menggunakan turbin *Savonius* yang dilengkapi *endplate*. Simulasi *steady* digunakan untuk mendapatkan langkah yang tepat dalam melakukan simulasi windturbine. Hasil mesh optimum yang didapatkan dari proses grid independency akan digunakan sebagai acuan base size simulasi *steady* maupun *unsteady*. Simulasi *steady* dilakukan pada sudut azimuth $0 - 120^\circ$ dengan menggunakan kecepatan inlet 10 m/s. Simulasi dengan menggunakan metode *steady* memerlukan waktu yang relatif lebih pendek dibandingkan dengan *unsteady*. Selain itu perubahan kondisi disekitar *Savonius* windturbine dapat ditampilkan pada setiap perubahan variasi sudut. Data momen yang didapat dari simulasi *steady* merupakan rata-rata yang didapat dari setiap variasi sudut azimuth.

Setelah melakukan simulasi *steady*, simulasi akan dilanjutkan dengan metode *unsteady*. Pada penelitian ini simulasi *unsteady* dilakukan dengan metode *rotating constant* dan DBFI 1-DOF. Simulasi *unsteady* juga dilakukan pada kecepatan 10 m/s. Keuntungan penggunaan simulasi *unsteady* adalah simulasi hanya menggunakan 1 model simulasi saja. Hal ini cenderung lebih praktis apabila dibandingkan dengan simulasi *steady*. Untuk melakukan simulasi *steady*

diperlukan model gambar sebanyak posisi yang di inginkan. Pada simulasi *unsteady* nilai momen yang didapat merupakan rata-rata dari nilai momen yang dihasilkan setiap time step. Simulasi *unsteady* cenderung menghasilkan keuntungan karena mengurangi waktu yang harus digunakan untuk menggambar model. Namun simulasi *unsteady* memiliki kerugian karena memerlukan waktu yang cukup lama pada proses running.

Metode simulasi *rotating constant* dan FSI 1-DOF memiliki beberapa perbedaan diantaranya data yang digunakan sebagai input, hasil simulasi dan waktu yang diperlukan untuk melakukan proses running. Metode *rotating constant* memerlukan data input berupa kecepatan angular turbin. Sedangkan metode FSI 1-DOF tidak memerlukan data kecepatan angular awal, dikarenakan pada metode ini kecepatan angular turbin dimulai dari 0 rad/s. Namun simulasi DBFI 1-DOF memerlukan data awal berupa massa dan momen inersia turbin. Jenis data yang dihasilkan oleh simulasi *rotating constant* meliputi gaya dan momen. Data yang dihasilkan oleh simulasi FSI 1-DOF jauh lebih bervariasi meliputi gaya, moment, kecepatan angular, momentum hingga percepatan. Simulasi FSI 1-DOF memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan *rotating constant* dikarenakan simulasi running FSI 1-DOF dimulai dari kondisi diam. Pada penelitian ini kedua metode akan dibandingkan performanya dengan metode *steady*.

4.1.1 Hasil Simulasi Turbin Savonius Endplate Pada Berbagai Metode

Simulasi *unsteady* akan dilakukan pada turbin *Savonius* dengan *endplate* menggunakan metode *rotating constant* dan FSI 1-DOF. Proses ini dilakukan untuk membandingkan kinerja semua metode simulasi dibandingkan dengan hasil eksperimen **Saha (2008)**. Simulasi akan dilakukan dengan kecepatan inlet 10 m/s.

Simulasi turbin statis dilakukan untuk mensimulasikan turbin yang diam pada berbagai sudut azimuth. Hasil data yang diperoleh berupa nilai C_Q pada berbagai sudut azimuth yang kemudian akan dirata-rata menjadi nilai C_Q pada titik kondisi TSR 0. Namun simulasi ini tidak menghasilkan nilai C_P akibat tidak adanya data kecepatan angular.

Simulasi turbin *Savonius* dengan metode *rotating constant* dilakukan dengan cara memasukkan nilai kecepatan angular yang diambil dari simulasi **Saha (2008)**. Pada simulasi ini kecepatan inlet yang digunakan adalah sebesar 10 m/s sehingga kecepatan angular yang dijadikan input adalah sebesar 581.332 rpm. Kecepatan angular akan dikalkulasikan dengan rata-rata momen yang didapat untuk memperoleh nilai C_P . Pada simulasi *rotating constant*, arah putaran kecepatan angular harus diperhatikan agar turbin tidak berputar pada arah yang terbalik. Arah putaran yang terbalik juga mempengaruhi data yang didapat. Pada simulasi ini time step diatur dari yang terbesar kemudian akan diperkecil untuk mendapatkan data yang lebih teliti. Hasil yang diperoleh dari simulasi dengan kondisi *rotating constant* berupa nilai C_P dan C_Q pada 1 titik optimum saja.

Simulasi yang dilakukan dengan metode FSI 1-DOF data C_Q maupun C_P , dari kondisi diam hingga mencapai kondisi steady dimana tidak ada perubahan kinerja pada turbin. Pada simulasi ini akan dilakukan perbandingan antara nilai C_Q yang dihasilkan dari simulasi kondisi statis dan FSI 1-DOF. Data yang dibandingkan merupakan nilai C_Q pada saat $TSR = 0$. Kemudian nilai C_P yang diperoleh dari eksperimen **Saha (2008)** akan dibandingkan dengan hasil simulasi metode *rotating constant* dan FSI 1-DOF. Nilai C_P yang dibandingkan merupakan nilai C_P pada kondisi optimum putaran turbin.

Tabel 4. 1 Perbandingan C_Q dan C_P pada turbin Savonius endplate dengan berbagai metode

Data	C_Q 0 rpm	Perbedaan (%)
Kondisi statis	0.4557	
Metode FSI 1-DOF	0.456	1.09
Data	C_P Optimum	Perbedaan (%)
Eksperimen	0.1271	
Constant rotating	0.0541	57.43
FSI 1-DOF	0.0465	63.41

Pada tabel 4.1 menampilkan perbandingan nilai C_Q turbin Savonius endplate statis dan simulasi FSI 1-DOF pada $TSR = 0$. Hasil simulasi yang dilakukan dengan metode FSI 1-DOF menghasilkan perbedaan yang sangat kecil

sekitar 1.09%. Sedangkan pada simulasi constant rotating dan FSI 1-DOF, nilai C_P yang dihasilkan sedikit berada dibawah data yang dihasilkan pada eksperimen.

4.1.2 Perbandingan Efektifitas Metode Simulasi

Pada sebuah penelitian simulasi numerik terdapat berbagai pertimbangan untuk menemukan hasil yang diinginkan. Beberapa hal penting yang harus dipertimbangkan diantaranya adalah waktu, dan kapasitas dari komputer. Simulasi yang memakan waktu lama menjadi kurang efektif jika memerlukan waktu yang lama dan memakan kapasitas memori yang lama.

Simulasi *steady* yang dilakukan dengan software numerik komersial memerlukan persiapan yang cukup lama untuk mempersiapkan gambar setiap variasi sudut. Pembuatan banyak gambar di Autodesk Inventor dan mehing memakan waktu yang lebih banyak dibandingkan waktu running. Banyaknya model simulasi yang harus dibuat menyebabkan simulasi riskan terhadap kesalahan input data dan model gambar. Namun simulasi *unsteady* sangat diperlukan untuk mendapatkan nilai eror dari simulasi dengan membandingkan nilai momen statis. Simulasi *steady* tidak dapat menampilkan nilai C_P dikarenakan simulasi *steady* tidak menghasilkan report angular velocity. Sehingga untuk mencari nilai C_P diperlukan data angular velocity yang diperoleh dari eksperimen turbin yang sama.

Simulasi *unsteady* baik dengan metode *rotating constant* maupun 1-DOF hanya membutuhkan 1 gambar model. Namun penggunaan simulasi *unsteady* memerlukan waktu yang cukup lama dibandingkan dengan kondisi *steady* dikarenakan simulasi dilakukan berdasarkan time step. Simulasi yang dilakukan dengan menggunakan metode *unsteady* 1-DOF memakan waktu lebih lama dibandingkan dengan *rotating constant* . Simulasi 1-DOF memulai perhitungan pada kondisi diam hingga mencapai kondisi maksimum. Simulasi ini juga menghasilkan data yang paling lengkap meliputi gaya, momen, momentum, kecepatan hingga percepatan baik linier maupun angular, sehingga dapat diperoleh data performa pada berbagai TSR. Data yang diperoleh dari simulasi 1-DOF dapat diolah menjadi C_Q maupun C_P , tanpa memerlukan data dari eksperimen sebelumnya. Simulasi *rotating constant* menghasilkan data momen

dan gaya pada kecepatan angular tertentu. Nilai kecepatan angular yang digunakan tidak boleh melebihi nilai kecepatan maksimum pada kondisi sebenarnya. Apabila simulasi dilakukan pada kecepatan angular yang lebih besar data momen yang didapat adalah 0. Selain waktu, memory yang diperlukan untuk menyimpan simulasi *unsteady* cukup besar. Hal ini dikarenakan data hasil simulasi direkam sebagai suatu animasi. Berikut perbandingan kinerja metode simulasi pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Efektifitas metode simulasi

Simulasi	Model	CPU hours	Data post processing
<i>Steady</i>	12	48	8 GB
Rotating constant	1	96	10 GB
FSI 1-DOF $\Delta t = 0.0005$	1	1800	160 GB
FSI 1-DOF $\Delta t = 0.005$	1	192	98 GB

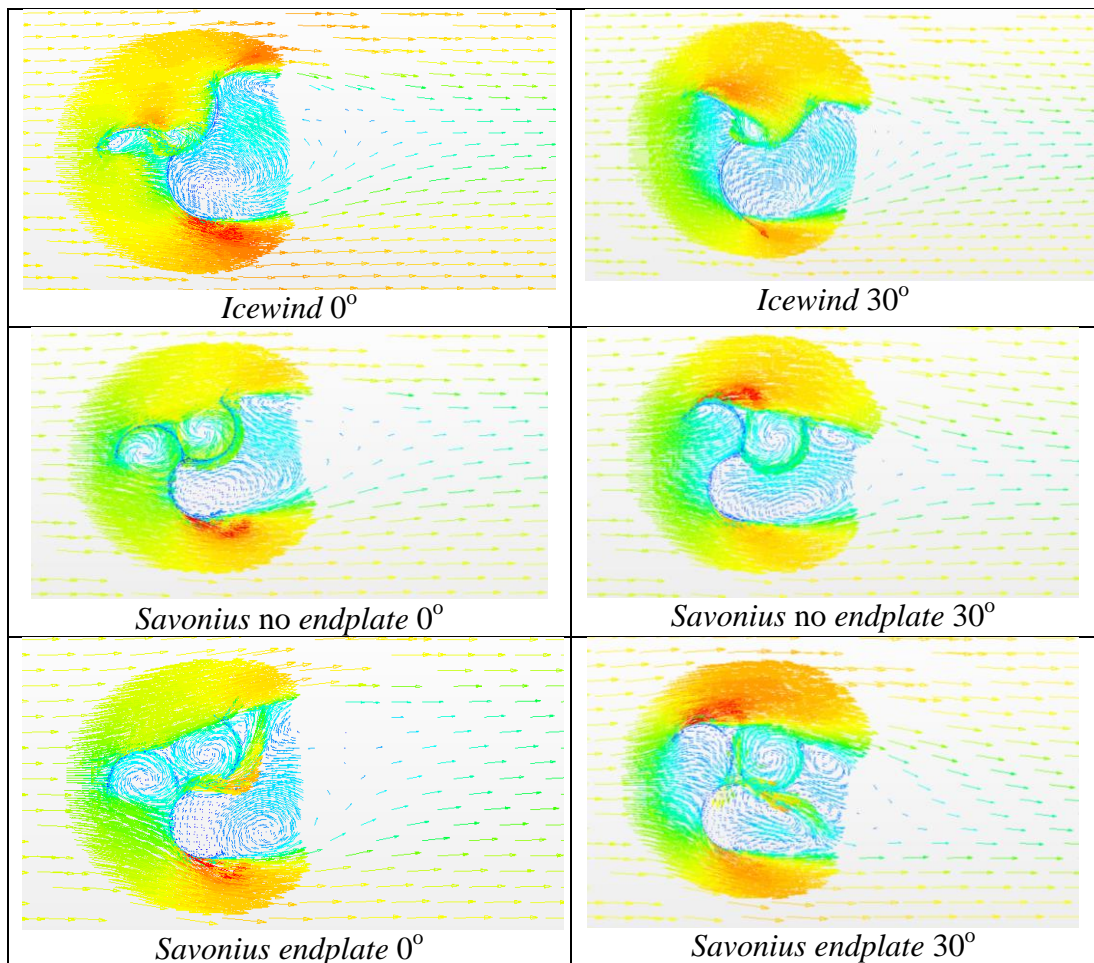
Berdasarkan penjelasan diatas penelitian ini akan dilakukan berdasarkan beberapa kondisi batas. Simulasi *steady* akan dilakukan pada kecepatan inlet 2, 4, 5, 8 dan 10 m/s. Simulasi *unsteady* 1 DOF akan dilakukan pada kecepatan inlet 2 dan 10 m/s. Sedangkan simulasi *unsteady rotating constant* akan dilakukan pada kecepatan inlet 10 m/s. Seluruh simulasi akan dilakukan pada turbin *Icewind* serta *Savonius* tanpa dan dengan *endplate*.

4.3. Simulasi Steady

Simulasi turbin pada kondisi *steady* dilakukan dengan menggunakan kecepatan inlet aliran 5 dan 10 m/s. Turbin akan di simulasikan pada sudut 0 – 120° dengan interval kenaikan 10°. Hasil kuantitatif simulasi *steady* berupa drag dan momen dari masing-masing posisi tubin. Gaya drag merupakan komponen utama gaya yang menyebabkan turbin dengan bentuk *Savonius* berputar. Besar kecilnya gaya drag akan mempengaruhi kondisi kecepatan aliran dan bentuk turbin. Momen yang dihasilkan turbin pada kondisi *steady* merupakan resultan gaya pada pusat turbin. Hasil *post processing* simulasi akan dijelaskan melalui *velocity vector*, *contur pressure*, *contur vorticity* dan *streamline* aliran.

4.3.1 Velocity vector

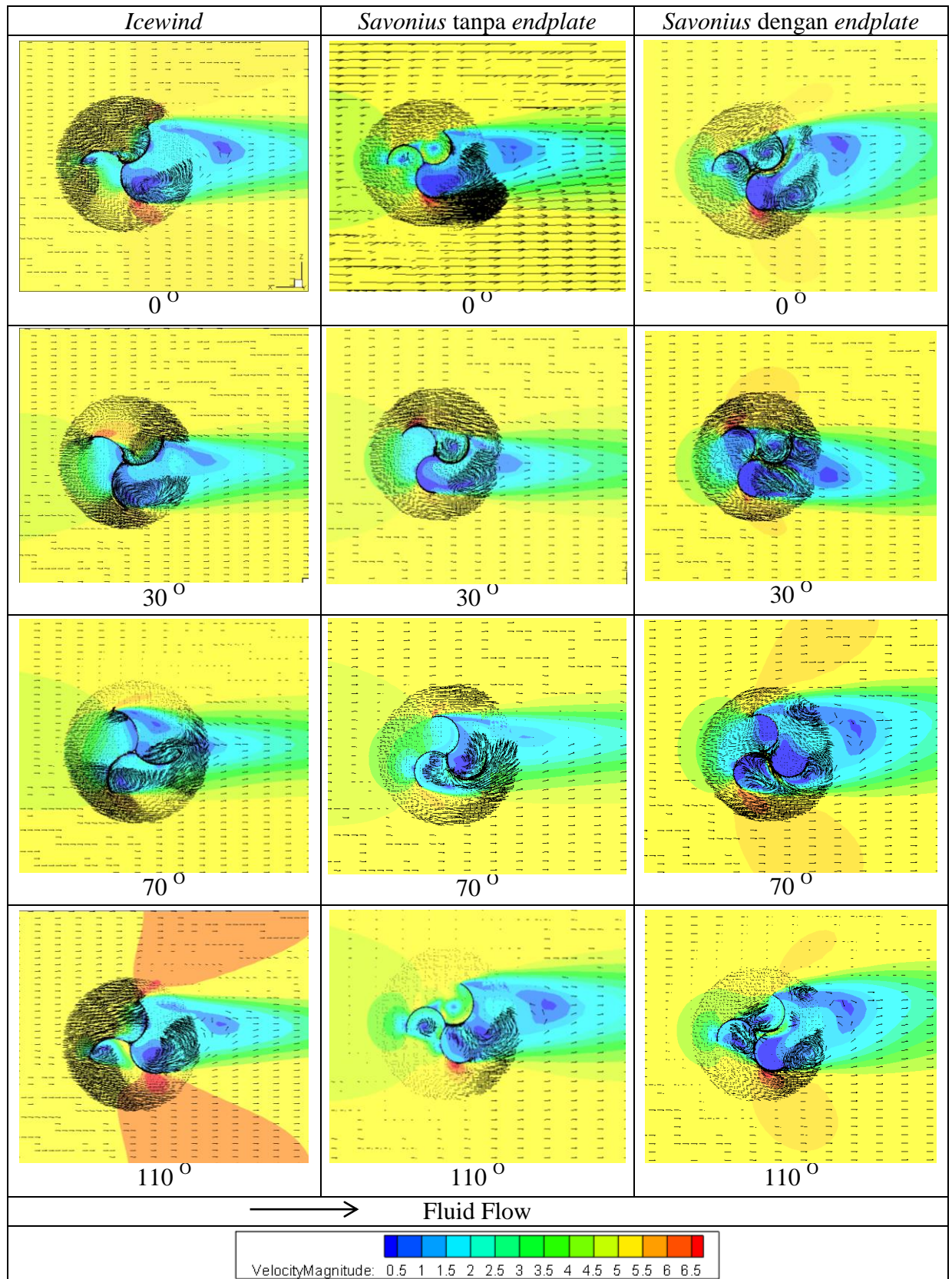
Pada gambar 4.2 terdapat gambar mengenai vektor kecepatan yang mengalir disekitar sudu turbin. Penambahan *endplate*, *overlap* dan perbedaan geometri dapat menyebabkan perbedaan arah aliran. Sebagai perbandingan dasar, perbedaan *streamline* akan di tinjau saat turbin berada pada sudut azimuth 0 dan 30°. Saat *Icewind* turbin berada pada sudut azimuth 0°, daerah *wake* yang terbentuk dibelakang sudu lebih lebar dibandingkan dengan dengan *wake* pada *Savonius* sudut azimuth 0°. *Wake* yang terbentuk diantara sudu turbin akan menghambat putaran turbin. Pada turbin *Icewind* dengan sudut azimuth 0° memiliki *wake* yang lebih lebar didaerah advancing blade dibandingkan dengan posisi 30°. Sehingga aliran yang datang dari *upstream* tidak langsung menabrak sudu, namu mendorong *wake* yang terbentuk di advancing blade.



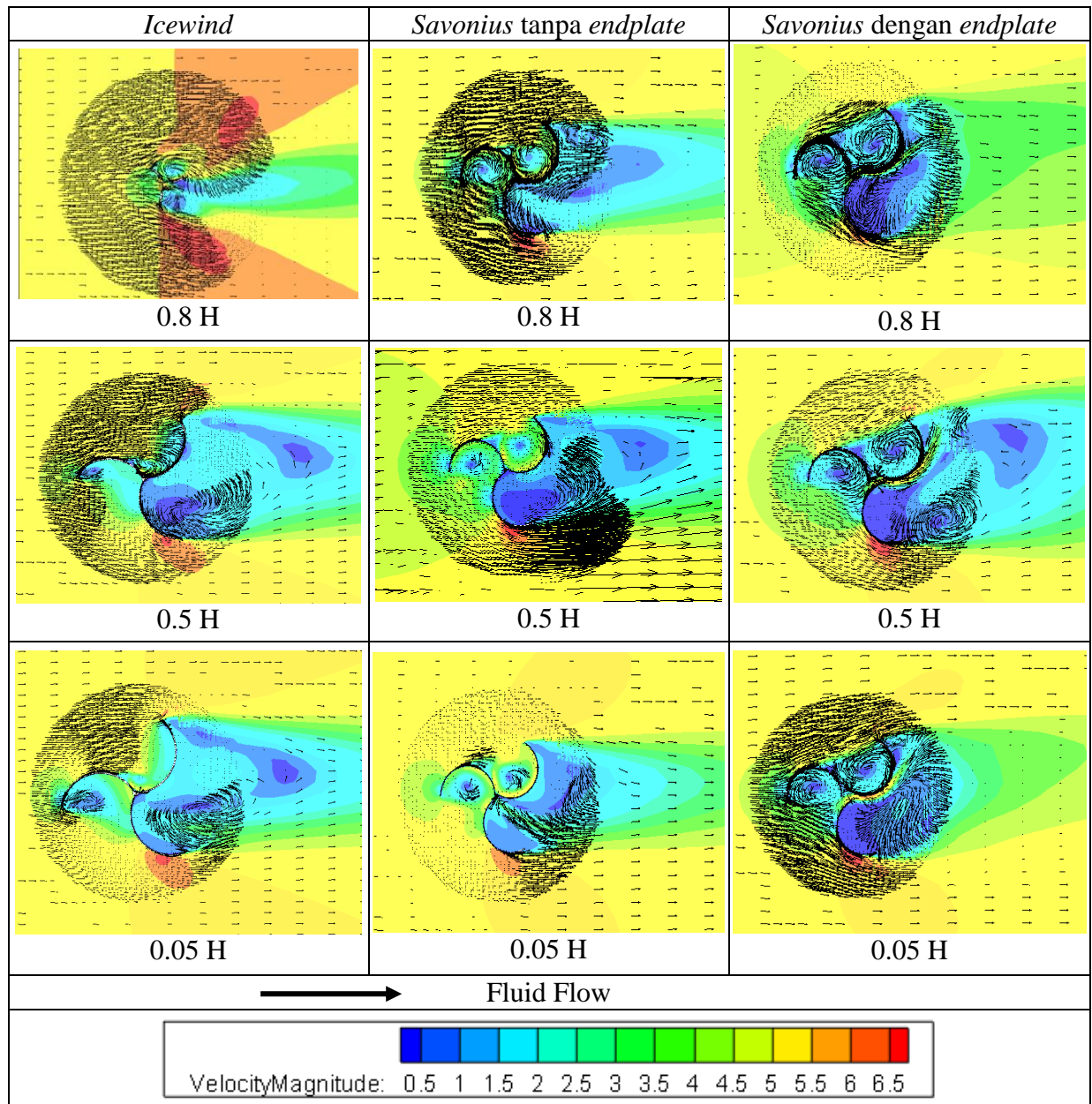
Gambar 4. 2 *Velocity vector* pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° dan 30°

Turbin *Savonius* yang dilengkapi dengan *endplate* memiliki *overlap* diantara sudu. Daerah *wake* yang terbentuk pada turbin *Savonius* yang memiliki *endplate* lebih besar dibandingkan dengan *Savonius* tanpa *endplate*. Hal ini disebabkan akibat adanya *backflow* yang mengalir melalui *concave* blade melalui *overlap*. *Backflow* tersebut akan membentuk suatu *vortex* pada sudu *concave* yang akan aliran yang mengalir dan mengisi area *wake* membentuk efek *flushing*. Sedangkan pada *Savonius* tanpa *endplate* yang tidak memiliki *overlap*, *backflow* yang mengalir dari *vortex* pada sudu *convex* terhalang oleh *connecting rod*. Akibatnya *overlap* pada sudu *Savonius* tanpa *endplate*, *wake* yang terbentuk pada sudu *concave* merupakan *death area* yang tidak bergerak.

Pada gambar 4.3 terdapat gambaran mengenai karakteristik aliran fluida yang mengalir disekitar turbin pada berbagai sudut azimuth. Karakteristik aliran fluida dinyatakan dalam vektor dan kontur kecepatan. Turbin tersebut disimulasikan pada kecepatan inlet 5 m/s. Hasil simulasi menunjukkan bahwa turbin *Icewind* pada sudut azimuth 30° memiliki daerah *wake* yang lebih sempit dibandingkan posisi sudut azimuth lain. Selain itu pada sudut azimuth 30° tidak terbentuk *wake advancing blade*. Kondisi ini menyebabkan aliran fluida inlet akan mendorong *advancing blade* pada area yang lebih luas. Pada *Icewind* seluruh posisi, terdapat *vortex* yang terbentuk pada *reversing blade*. Namun *vortex* yang terbentuk pada sudut 70° dan 110° tidak mendorong *reversing blade* seperti yang terlihat pada 0° dan 30° . Hal ini menyebabkan nilai C_p yang dihasilkan turbin *Icewind* pada sudut azimuth 0° dan 30° lebih tinggi dibandingkan sudut 70° dan 110° . Perbandingan antara berbagai turbin pada kondisi optimum di sudut azimuth 30° dapat dilihat pada gambar 4.3. Pada turbin *Savonius* tanpa *endplate* *wake* yang dihasilkan lebih besar apabila dibandingkan dengan turbin *Savonius* *endplate* dan *Icewind*. Selain itu daerah efektif yang terdorong oleh aliran fluida pada turbin *Savonius* tanpa *endplate* lebih kecil dibandingkan dengan turbin lain. Sedangkan pada turbin *Savonius* *endplate* memiliki *overlap* yang dapat dilalui oleh aliran fluida yang terkumpul di depan *adversing blade*. Aliran fluida yang mengalir melalui *overlap* akan mendorong *wake* yang berada diantara *reversing blade*. Aliran tersebut akan mempersempit daerah *wake* yang terbentuk dan mendorong *wake* menjauhi turbin.



Gambar 4.3 *Velocity vector and contour* pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0°, 30°, 70°, dan 110°



Gambar 4.4 *Velocity vector* dan *contour* pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° dengan plane 0.05H, 0.5H dan 0.8H

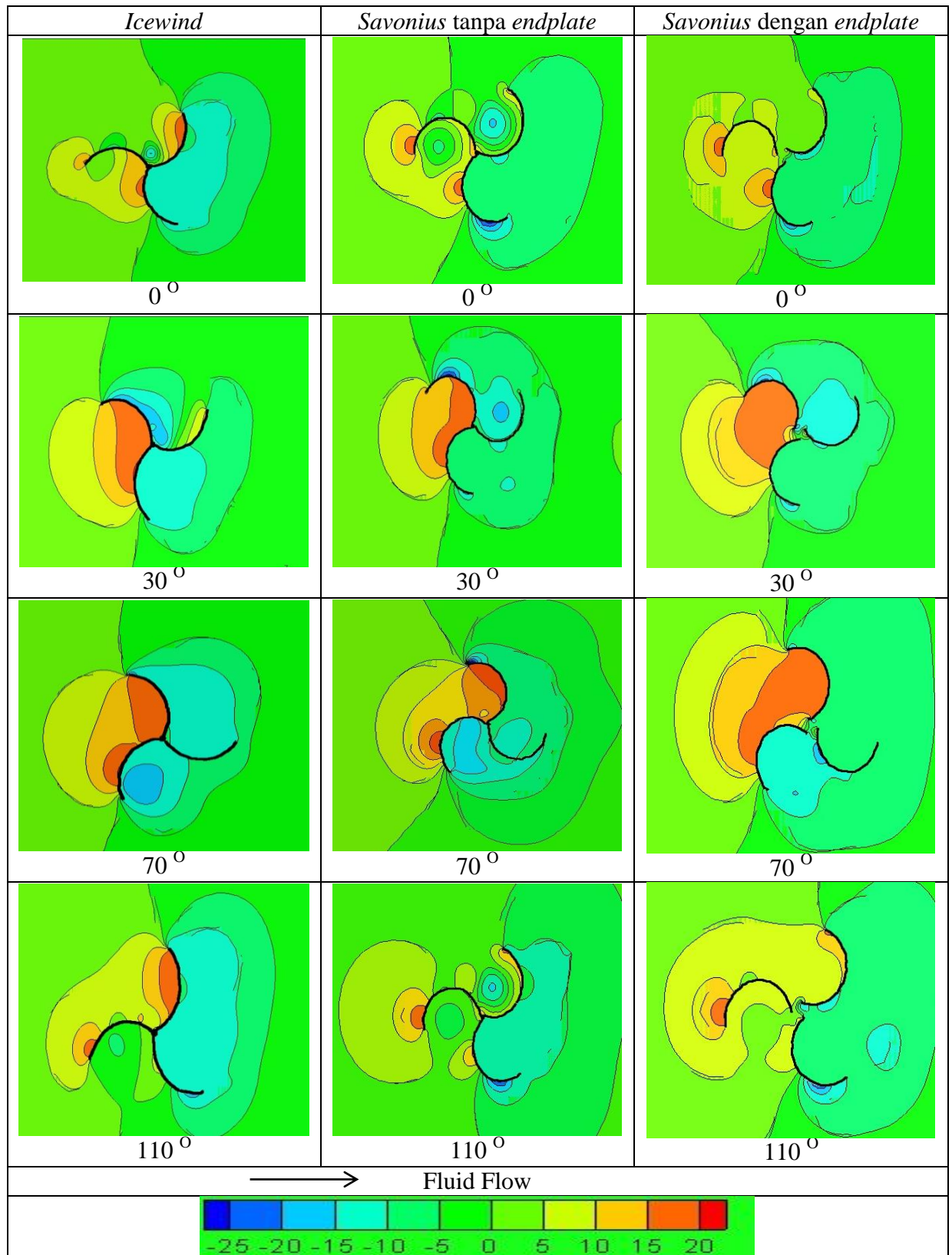
Pada gambar 4.4 terdapat gambaran mengenai karakteristik aliran fluida yang mengalir melalui turbin Icewind, Savonius tanpa dan dengan endplate pada sudut azimuth 0° . Karakteristik aliran yang melewati turbin dinyatakan dalam vektor dan kontur kecepatan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa aliran fluida yang berada diantara sudu memiliki kondisi yang berbeda pada berbagai ketinggian. Pada simulasi ini, ketinggian yang akan ditinjau ada pada potongan plane 0.05H, 0.5H dan 0.8H. Pada seluruh turbin memiliki wake yang cukup luas pada

ketinggian $0.05H$. Namun wake yang terbentuk akan semakin menyempit seiring dengan kenaikan tinggi turbin.

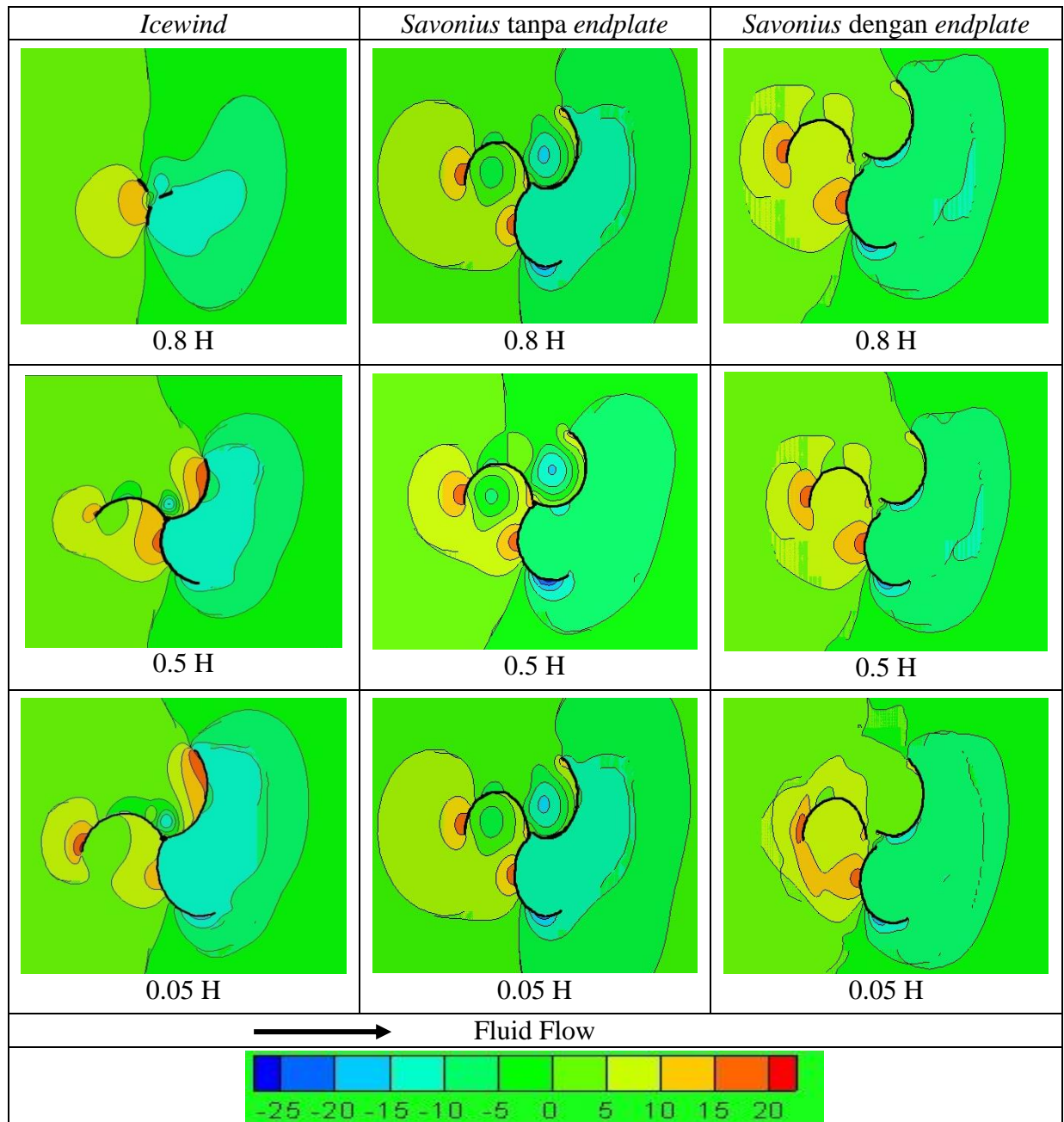
4.3.2 Static pressure contour

Turbin akan berputar akibat adanya perubahan tekanan yang terjadi pada sudu. Perbedaan tekanan pada masing-masing sudu turbin *Icewind*, *Savonius* tanpa dan dengan *endplate* ditunjukkan pada gambar 4.5. Pada daerah dengan velocity tinggi akan menghasilkan area bertekanan rendah. Indikator kontur menunjukkan tekanan di depan sudu *concave* memiliki warna merah yang berarti bagian tersebut memiliki tekanan tinggi. Selanjutnya fluida akan bergerak dari tekanan tinggi ke rendah dimana aliran sudu *concave* akan mengalir ke daerah tekanan rendah dibelakang sudu tersebut. Aliran tersebut akan mendorong sudu untuk berputar kebelakang. Hal ini menunjukkan bahwa aliran fluida mengalir ke arah kanan sehingga turbin akan bergerak secara clockwise.

Selain menunjukkan arah putaran turbin, perbedaan tekanan yang terjadi pada blade juga mengindikasikan performa yang dihasilkan turbin. Power yang dihasilkan oleh turbin dapat diukur melalui perbedaan tekan fluida yang mengalir dengan debit tertentu. Secara kasat mata, perubahan tekanan yang terjadi dapat dilihat melalui perbedaan indikator warna pada advancing blade. Pada simulasi yang dilakukan pada turbin *Saonius* dengan *endplate* menunjukkan perubahan indikator warna yang berubah drastis pada area yang lebih luas. Perubahan indikator warna secara drastis juga ditunjukkan oleh turbin *Savonius* tanpa *endplate*. Namun pada simulasi turbin *Savonius* tanpa *endplate*, terdapat pusaran wake yang terbentuk diantara sudu. Kemunculan wake diantara sudu menyebabkan hambatan terhadap putaran turbin. Selain itu wake yang terbentuk diantara advancing blade dapat mengurangi luasan area efektif. Pada turbin *Savonius* yang dilengkapi *endplate*, terdapat overlap diantara sudu yang dapat mengalirkan fluida yang terkumpul diantara sudu. Dengan demikian terbentuknya pusaran wake diantara sudu dapat dihindari. Pada *Icewind* turbin wake yang terbentuk dapat dikurangi walaupun tidak memiliki overlap. Hal ini disebabkan akibat struktur blade *Icewind* yang berlekuk menyebabkan fluida dengan energi tinggi mengisi daerah kosong diantara sudu.



Gambar 4. 5 *Pressure conture* pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0°, 30°, 70°, dan 110°



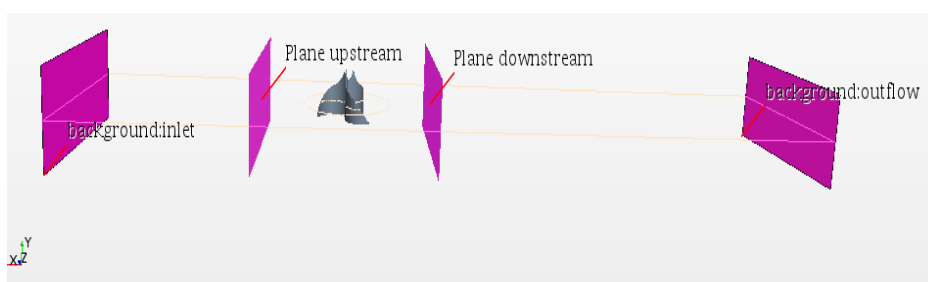
Gambar 4. 6 *Pressure conture* pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° dengan plane 0.05H, 0.5H dan 0.8H

Gambar 4.6 merupakan contour tekanan pada turbin *Icewind*, *Savonius* tanpa dan tanpa *endplate* pada ketinggian 0.05H, 0.5H dan 0.8H. Pada contour tekanan pada turbin *Savonius* tanpa *endplate* terlihat tidak berubah terhadap perubahan ketinggian tubin. Hal ini mengindikasikan bahwa gaya tekan dengan besar yang sama bekerja sepanjang penampang turbin. Sedangkan pada turbin *Savonius* dengan *endplate* memiliki perubahan warna kontur dan terlihat jelas

pada bagian belakang turbin. Pusaran dibelakang turbin memiliki luasan dan bentuk yang berbeda. Sehingga dimungkinkan aliran akan bergerak dengan kecepatan yang berbeda dan membentuk *streamline* yang berbeda. Kontur aliran pada turbin *Icewind* sangat dipengaruhi oleh perubahan ketinggian turbin. Hal ini dikarenakan *Icewind* turbin memiliki bentuk asyetric yang berubah sepanjang ketinggiannya. Untuk lebih memperjelas kondisi aliran akibat perubahan kontur tekanan terhadap ketinggian turbin, penelitian ini dilengkapi dengan tabel 4.3. Titik pengambilan data tekanan dijabarkan pada gambar 4.7.

Tabel 4. 3 Selisih tekanan pada daerah *upstream* dan *downstream*

Turbin	Sudut	Tekanan Statis (Pa)		Selisih
		Upstream	Downstream	
Icewind	0 °	2.526	-1.113	4.301
	30 °	3.545	-0.828	4.373
	70 °	3.185	-0.223	3.408
	110 °	2.943	-0.670	3.613
Savonius tanpa Endplate tanpa Overlap	0 °	2.024	-0.023	2.047
	30 °	2.206	0.189	2.017
	70 °	2.535	-0.545	3.080
	110 °	2.030	-0.060	2.090
Savonius dengan Endplate dan Overlap	0 °	1.595	0.229	1.366
	30 °	1.518	0.132	1.386
	70 °	2.218	0.174	2.045
	110 °	1.803	0.240	1.563



Gambar 4. 7 Letak poin pengambilan data tekanan

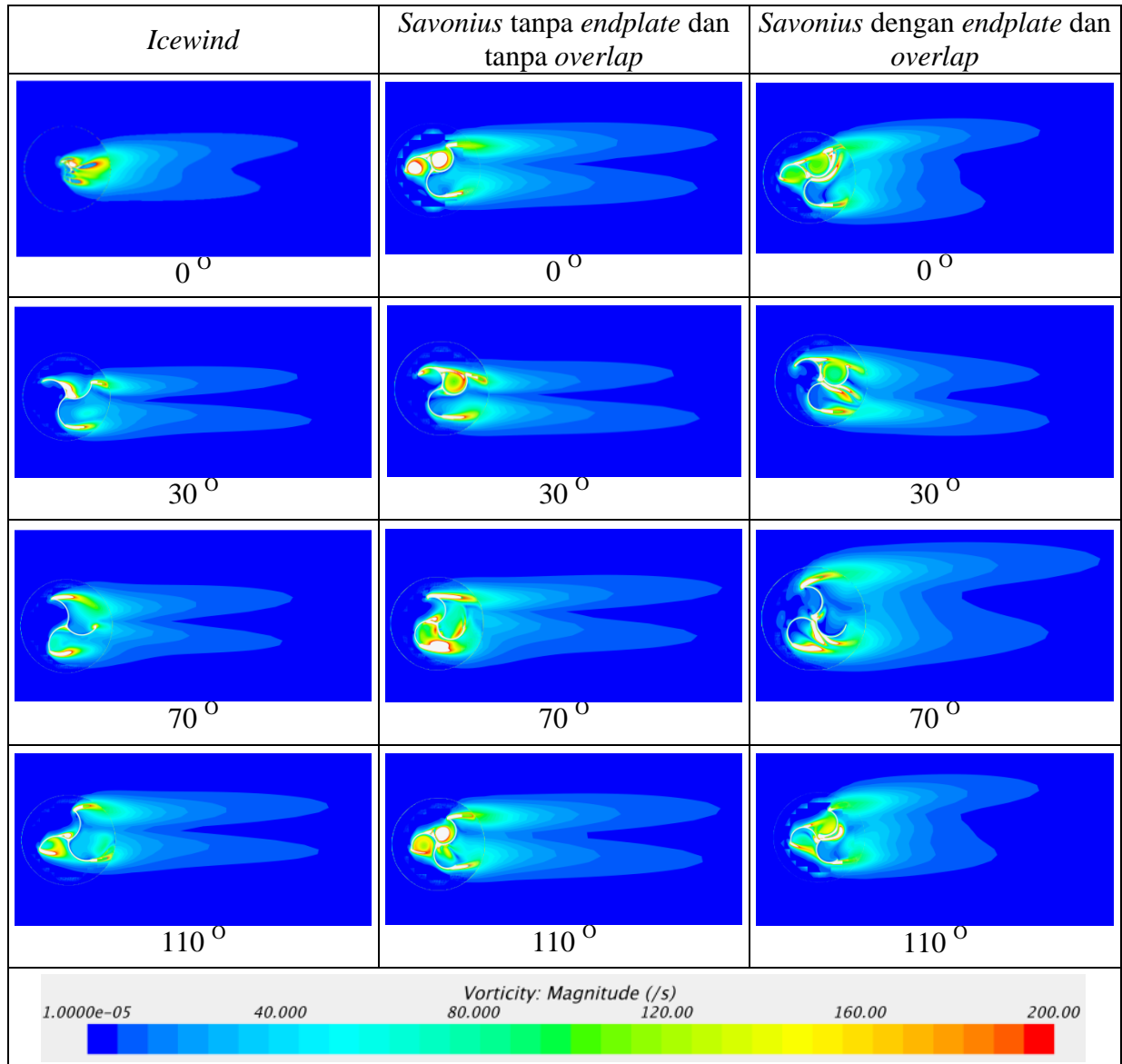
4.3.3 Vorticity contour

Pada fluida yang melewati sebuah saluran diam 3-D akan memungkinkan munculnya gerakan translasi dan rotasi elemen fluida. Tentu saja gerakan rotasi fluida akan muncul pada benda 3-D yang berputar. *Vorticity* merupakan suatu

ukuran rotasi dari sebuah elemen fluida yang bergerak. Besarnya kecepatan putaran elemen fluida dipengaruhi kecepatan, ketinggian dan arah vektor aliran. Nilai *vorticity* lebih besar dibandingkan vektor kecepatan angular pada benda yang berputar. Pada axis rotasi vortisitas akan bernilai 0, sedangkan nilai maksimum vortisitas dihasilkan pada daerah dekat dinding. Vektor elemen fluida akan bernilai positif apabila berlawanan dengan arah jarum jam.

Putaran elemen pada fenomena *vorticity* dapat menimbulkan perubahan karakteristik aliran saat mengalami perubahan putaran. Perubahan *vorticity* alirandapat berupa positif maupun negatif *vorticity* advance. Positive *vorticity* advance (PVA) terjadi akibat elemen berputar mengalami kenaikan kecepatan putaran. Persitiwa PVA akan menyebabkan kenaikan kecepatan putaran namun tekanan area tersebut akan mengalami penurunan. Area PVA secara kasat mata dapat ditandai dengan munculnya *wake*.

Pada gambar 4.8 terdapat indikator warna yang melambangkan *vorticity* elemen fluida yang diambil dari midplane. Area berwarna putih pada kontur melambangkan *vorticity* yang sangat tinggi, melebihi batas maksimum indikator warna. Dari tersebut dapat dilihat bahwa pada turbin *Icewind* pada sudut azimuth 30° yang memiliki area berwarna putih dengan kecepatan tinggi pada area di dekat connecting rod. Kontur *vorticity* yang dihasilkan oleh sudut azimuth 0° lebih rendah apabila dibandingkan dengan sudut azimuth lain. Sehingga perubahan pressure dan kecepatan yang terjadi disekitar turbin dengan sudut azimuth 30° meliputi area yang sempit paling sempit bila dibandingkan dengan turbin *Icewind* di posisi lain. Hal ini akan menyebabkan daerah *wake* yang terbentuk disekitar turbin lebih kecil. Pada ujung-ujung sudut di daerah *downstream* terdapat area yang berwarna hijau dan melengkung mengikuti bentuk sudu. Ini berarti elemen fluida yang berada pada kedua ujung sudu memiliki kecepatan rotasi lebih besar dengan arah mengikuti kontur. Semakin lengkung arah yang dibentuk akan menimbulkan efek interferensi pada aliran yang bertabrakan. Akibatnya akan makin banyak *vortex* dan *wake* kecil yang terbentuk. Bentuk aliran *downstream* yang paling lengkung terjadi saat turbin berada pada posisi sudut azimuth 30° .

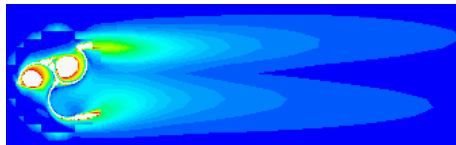


Gambar 4.8 *Vorticity* contour pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0°, 30°, 70°, dan 110°

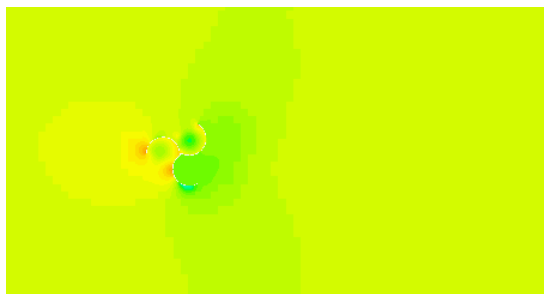
Pada turbin *Savonius* tanpa *endplate* dengan posisi 30° memiliki area kontur paling sempit apabila dibandingkan dengan dengan posisi sudut azimuth lain. Hal ini menyebabkan berkurangnya area *wake* yang terjadi pada saat sudut azimuth turbin 30°. Selain itu *vorticity* yang dihasilkan sudut azimuth 30° tidak ada yang melebihi 200/s, ini relatif rendah bila dibandingkan dengan sudut lain. Bila dibandingkan dengan turbin *Icewind* dan *Savonius* dengan *endplate*, nilai minimum koefisien drag yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* tanpa enplate adalah yang paling negatif. Kondisi ini disebabkan adanya *vorticity* yang sangat

tinggi diantara sudu, sehingga menimbulkan gradien PVA yang cukup tinggi dibanding sudut lain. Semakin tinggi gradien PVA menyebabkan perubahan tekanan yang semakin tinggi dan *vortex* yang dihasilkan semakin besar.

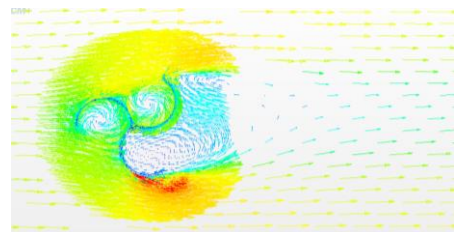
Turbin *Savonius* yang dilengkapi dengan *endplate* memiliki indikator *vorticity* yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin lain. Area *vorticity* yang terbentuk pada *Savonius endplate* juga memiliki bentuk lebih pipih dan tidak memanjang. Kondisi ini cukup berbeda apabila dibandingkan dengan *Savonius* tanpa *endplate* dan *Icewind*. Kondisi ini terjadi akibat adanya *overlap* di kedua ujung turbin. Adanya *endplate* mempengaruhi deformasi *vorticity* dan kondisi area *vortex* yang terbentuk. Selanjutnya pengaruh *overlap* dan *endplate* akan dijelaskan pada bagian pathline.



(a)



(a)

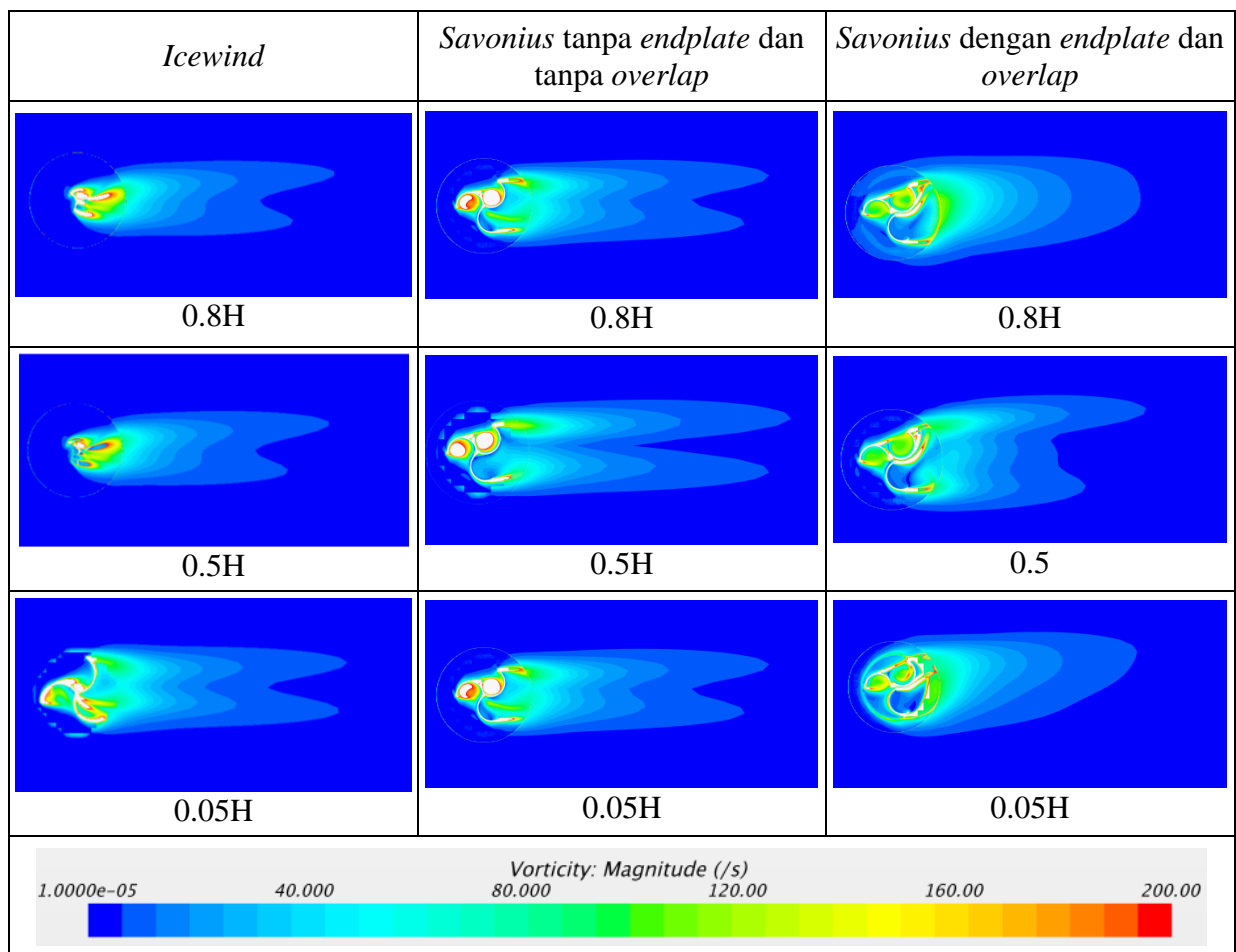


(b)

Gambar 4. 9 Perbandingan (a)*Vorticity contour*, (b) *pressure contour* dan (c) *velocity vector* pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0°

Dari pembahasan yang telah dilakukan sebelumnya terdapat grafik *vorticity*, static pressure dan *velocity vector*. Daerah yang memiliki *vorticity* tinggi, memiliki tekanan statis yang rendah sehingga fluida yang mengalir disekitarnya memiliki kecepatan tinggi. Pada 4.9 terdapat sudu *Savonius* tanpa *endplate*, dimana pada sudu *concave*nya terdapat udara yang bervorticity tinggi. Fluida disekitar gulungan udara tersebut, memiliki *vorticity* yang lebih rendah dan

tekanan yang lebih tinggi. Aliran udara tersebut akan mengalami penurunan kecepatan hingga mencapai 0 m/s dan menimbulkan reverse flow. Aliran reverse flow, menabrak aliran dekat sudu dan menggulung membentuk suatu *vortex*. Dalam *vortex* tersebut terdapat area kosong yang disebut dengan *wake*. Bila dilihat dari fenomena tersebut *wake* terjadi pada udara yang bergulung dengan *vorticity* tinggi dan tekanan rendah yang memiliki kecepatan mendekati 0 m/s.



Gambar 4. 10 *Vorticity* conture pada turbin dengan kecepatan 5 m/s pada sudut 0° dengan plane 0.05H, 0.5H dan 0.8H

Aliran fluida yang melewati turbin akan mengalami perubahan pada setiap titik. Perubahan karakteristik aliran juga terjadi pada sepanjang ketinggian turbin seperti yang tampak pada gambar 4.10. Pada turbin *Savonius* tanpa *endplate* kontur *vorticity* pada bagian ujung atas dan bawah memiliki bentuk dan indikator warna yang sama. Hal ini mengindikasikan kecepatan dan *streamline* yang sama dari aliran fluida dikedua ujung turbin. Namun 0.5 H, turbin *Savonius* tanpa

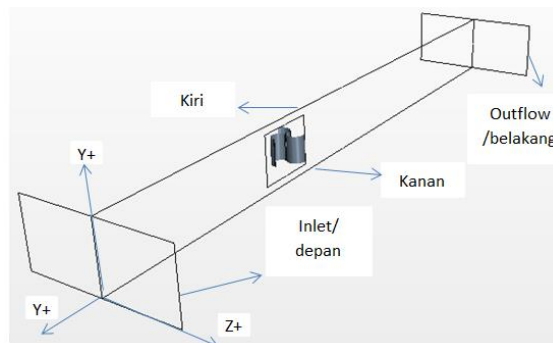
endplate mengalami perubahan kontur *vorticity* terutama pada bagian *wake* dibelakang turbin. Kontur *vorticity* yang dihasilkan pada turbin *Savonius endplate* berubah terhadap perbedaan ketinggian turbin. Perubahan kontur ini disebabkan akibat adanya pengaruh *endplate* dan *overlap* pada turbin. Turbin *Icwind* memiliki perubahan kontur *vorticity* akibat adanya bentuk *asymetric* yang berubah sepanjang ketinggian. Perubahan aliran yang terjadi pada turbin akan terlihat jelas pada *pathline* aliran yang terbentuk.

Kontur *vorticity* tidak dapat menjelaskan perubahan karakteristik aliran secara *real*. Apabila nilai *vorticity* ditampilkan pada suatu grafik yang mencakup nilai *vorticity* sepanjang *line* acuan, perubahan fenomena aliran akan mampu dijelaskan dengan cukup menarik.

Aliran fluida yang memiliki *vorticity* tinggi memiliki turbulensi yang tinggi dan menimbulkan energi disipasi. Energi disipasi yang terjadi akibat putaran fluida dapat menyebabkan munculnya *energy loss* yang cukup besar seiring dengan tingginya perubahan *vorticity*.

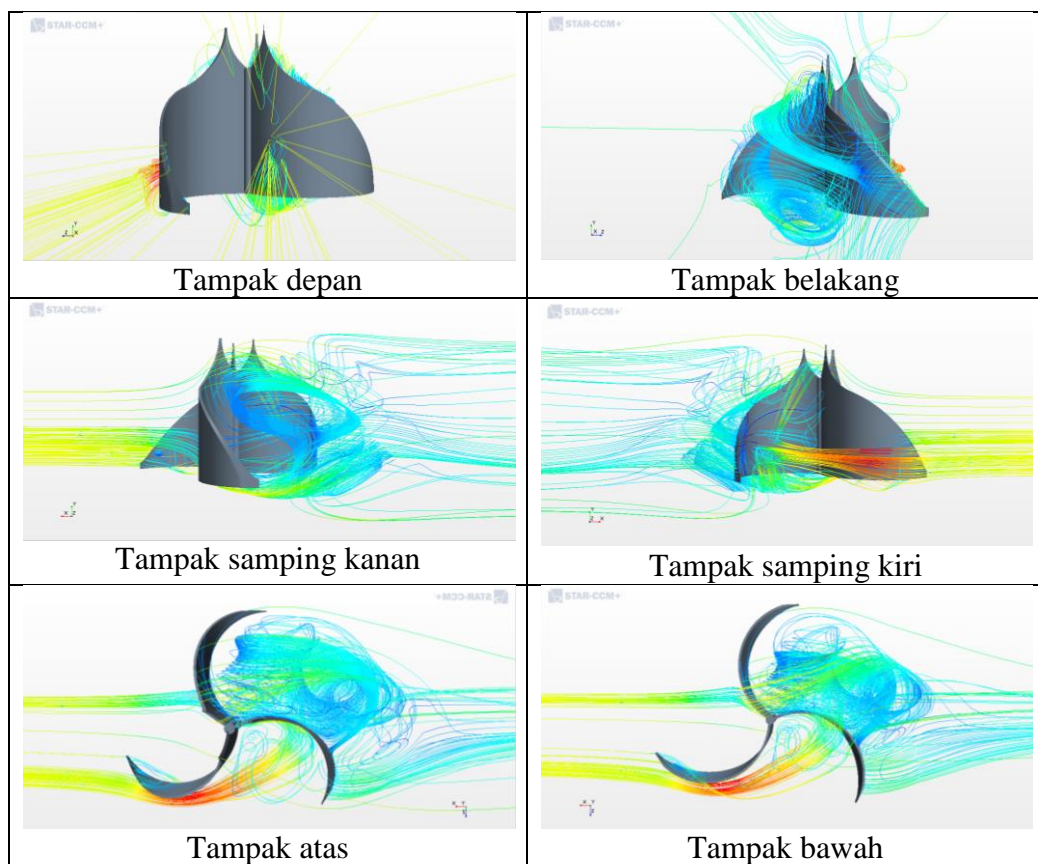
4.3.4 *Pathline* aliran

Pathline merupakan garis aliran partikel fluida yang bergerak membentuk suatu kurva disekitar objek. Pada pembahasan penelitian ini *path line* akan ditampilkan secara 3 dimensi untuk mengetahui secara jelas fenomena yang terbentuk oleh aliran fluida yang mengalir pada turbin *Savonius*. *Pathline* akan disajikan dalam beberapa pandangan gambar untuk merekam secara detail fenomena yang terjadi. *Pathline* akan ditampilkan dan dibahas untuk setiap turbin pada kecepatan 5 m/s dan sudut azimuth 0° dengan berbagai potongan gambar. Gambar *pathline* akan ditampilkan dengan potongan seperti gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Potongan penampang pada *pathline*

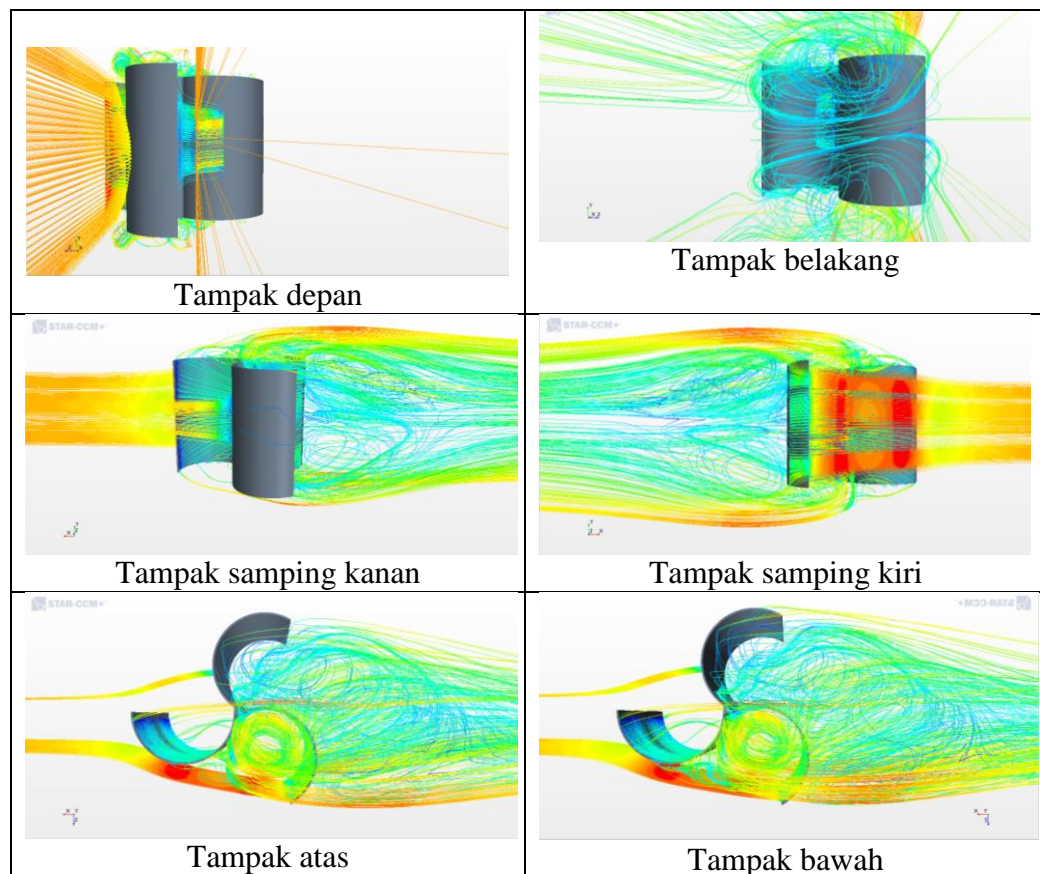
Gambar 4.12 menunjukkan pathline kecepatan *Icewind* turbin yang terbentuk pada sudu azimuth 0° dengan kecepatan inlet 5 m/s. Dapat dilihat dibagian *upstream* bahwa turbin fluida mengalir dari inlet menabrak sudu dan terseparasi menjadi 3 yaitu mengalir ke melalui bawah sudu atas dan bawah. Aliran separasi mengalir ke bagian belakang sudu karena daerah tersebut memiliki tekanan yang lebih rendah. Aliran tersebut berputar menghasilkan *wake* yang besar dibelakang turbin.



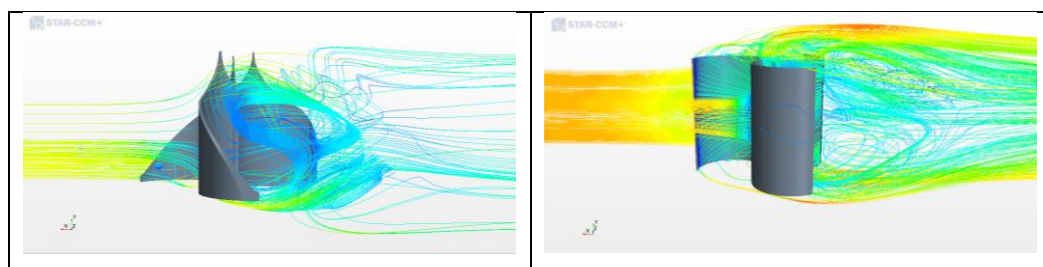
Gambar 4. 12 Pathline turbin *Icewind* pada kecepatan 5 m/s

Gambar 4.13 menunjukkan pathline kecepatan turbin *Savonius* tanpa *endplate* yang terbentuk pada sudu azimuth 0° dengan kecepatan inlet 5 m/s. Terlihat jelas bahwa terdapat asanya aliran sekunder 3 D pada bagian atas dan bawah turbin. Dapat dilihat dibagian *upstream* bahwa turbin fluida mengalir dari inlet menabrak sudu dan terseparasi menjadi 3 yaitu mengalir ke melalui bawah sudu atas dan bawah. Aliran separasi mengalir ke bagian belakang sudu karena daerah tersebut memiliki tekanan yang lebih rendah. Aliran tersebut berputar

menghasilkan *wake* yang besar dibelakang turbin. Apabila diperhatikan dari pandangan samping, *wake* yang terbentuk dibelakang turbin *Savonius* tanpa *endplate* sangat kuat dan meliputi area yang luas. Area yang terbentuk berupa 2 pusaran terpisah yang terjadi akibat aliran fluida hasil separasi bagian samping atas menggulung dibagian atas dan aliran separasi bagian samping bawah menggulung dibawah. Selanjutnya aliran fluida yang terseparasi ke atas dan bawah membentuk lapisan *pathline* tersendiri di atas *wake*. Dari pandangan samping *wake* yang terbentuk menyerupai aliran yang melewati sebuah dilinder pejal yang berdiri secara vertikal.

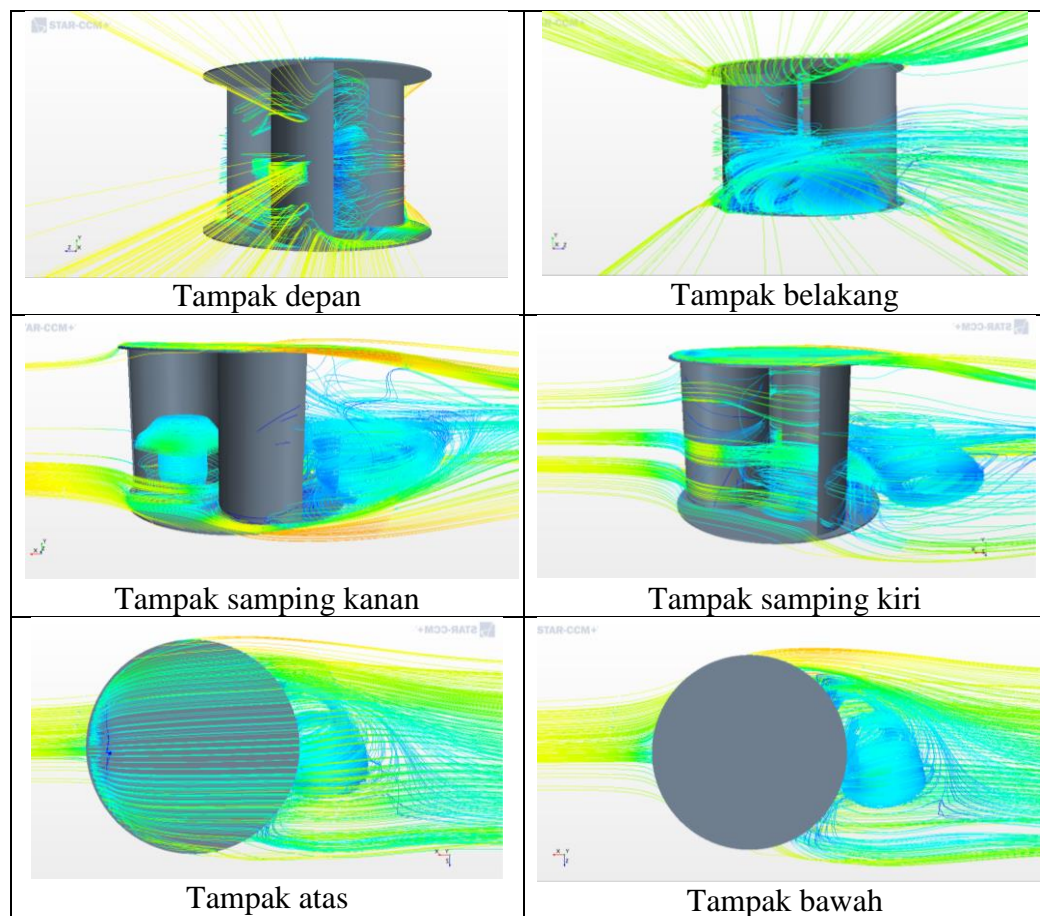


Gambar 4. 13 Pathline turbin *Savonius* tanpa *endplate* pada kecepatan 5 m/s



Gambar 4. 14 Pathline turbin *Savonius* tanpa *endplate* dan *Icwind* pada 5 m/s

Pada turbin *Savonius* tanpa *endplate* sudut azimuth 0° yang dilalui kecepatan 5 m/s, pathline area *wake* yang terbentuk lebih besar dibandingkan *Icewind* seperti yang tampak pada 4.14. Turbin *Icewind* terbentuk dari kurva lengkung pada sisi sudutnya. Kurva tersebut berfungsi untuk mengalirkan aliran yang terseparasi membentuk suatu aliran spiral yang mengisi area belakang sudu. *Wake* yang terbentuk pada *Icewind* dapat ditekan dan bentuknya menjadi lebih kecil dan lebih lemah.



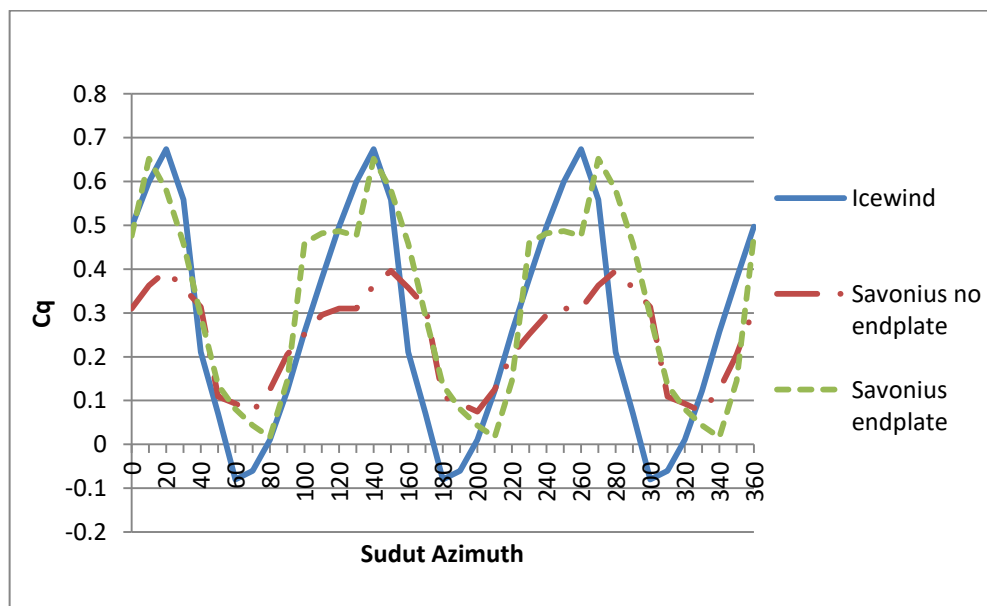
Gambar 4. 15 Pathline turbin *Savonius* dengan *endplate* pada kecepatan 5 m/s

Gambar 4.15 menunjukkan pathline kecepatan turbin *Savonius* tanpa *endplate* yang terbentuk pada sudu azimuth 0° dengan kecepatan inlet 5m/s. Pada sudu *upstream vortex* yang terbentuk memiliki bentuk yang berbeda apabila dibandingkan dengan *vortex* pada *Savonius* tanpa *endplate*. *Wake* yang dibentuk oleh turbin *Savonius endplate* berbeda dengan turbin *Savonius* yang tidak dilengkapi dengan *endplate*. Hal ini dikarenakan turbin *Savonius* yang memiliki *overlap* yang dapat dilalui oleh aliran fluida menuju sudu reversing blade. Aliran

fluida yang terkumpul di depan sudu *adversing blade* akan mengalir melalui celah *overlap*. Aliran tersebut akan mengalir daerah kosong yang mungkin terbentuk diantara sudu reversing blade. Sehingga daerah *wake* yang terbentuk dibelakang turbin *Savonius* akan berkurang.

4.3.5 Momen

Selain gaya drag, performa turbin *Savonius* dapat ditunjukkan pula dengan nilai koefisien momen yang dihasilkan oleh putaran turbin. Momen merupakan resultan gaya yang bekerja titik berat pada turbin. Gambar 4.13 menunjukkan nilai koefisien momen yang dihasilkan oleh turbin *Icewind*, *Savonius* tanpa dan dengan *endplate* pada posisi 0 – 120° saat kecepatan inlet 5 m/s. Trendline momen yang dihasilkan turbin *Savonius* memiliki bentuk yang sama bila dibandingkan dengan *Icewind* turbin. Turbin *Icewind* terbuat dari geometri *Savonius* yang dipotong, sehingga trendline yang dihasilkan memiliki bentuk yang hampir sama.



Gambar 4.16 Grafik C_Q terhadap sudut azimuth kecepatan 5 m/s

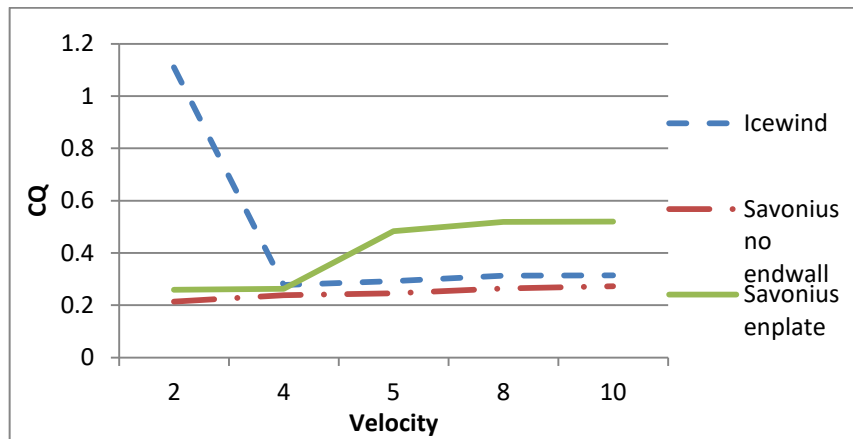
Icewind dan *Savonius endplate* dihasilkan nilai dan trendline C_Q yang hampir sama ditunjukkan pada gambar 4.16. Kontur *vorticity* dengan potongan midplane yang telah dilampirkan pada bagian sebelumnya dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena perbedaan grafik C_Q ini. Pada sudut azimuth 30° turbin *Icewind* memiliki daerah *vorticity* yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin

Savonius. Sehingga momen yang dihasilkan *Icewind* turbin pada posisi 30° lebih besar dibandingkan dengan *Savonius*. Pada saat turbin *Savonius* mengalami penurunan *vorticity* pada posisi sudut azimuth 70° , momen yang dihasilkan mengalami peningkatan. Pada sudut 70° *Icewind* dan *Savonius* tanpa *endplate* juga mengalami penurunan nilai momen. Penurunan nilai koefisien momen terbesar terjadi pada turbin *Icewind*.

Selanjutnya dilakukan simulasi *steady* pada kecepatan 2, 4, 5, 8 dan 10 m/s untuk mengetahui perubahan performa kerja yang terbaik diantara turbin *Icewind*, *Savonius* dengan dan tanpa *endplate*. Hasil simulasi yang diambil adalah nilai momen yang dihasilkan oleh setiap posisi pada tabel 4.4. Nilai momen yang didapat akan dirata-rata menjadi momen total yang dihasilkan pada satu putaran. Pada tabel 4.4 dapat dilihat bahwa semakin meningkat kecepatan menyebabkan kenaikan momen pada turbin. Kenaikan terbesar dialami oleh turbin *Icewind*. Namun untuk menyatakan suatu performa diperlukan suatu nilai tak berdimensi sebagai tingkatan acuan. Nilai momen yang bekerja pada turbin dapat dinyatakan secara tidak berdimensi dengan menggunakan koefisien momen (C_Q). Performa turbin dalam nilai C_Q dapat dilihat pada grafik 4.17. Performa terbaik dihasilkan turbin *Savonius* dengan menggunakan *endplate* pada kecepatan 4 - 10 m/s. Namun pada kecepatan kurang dari 4 m/s, nilai C_Q maksimum dihasilkan oleh *Icewind* turbin.

Tabel 4. 4 Momen simulasi *steady*

Velocity (m/s)	Momen (Nm)		
	<i>Icewind</i>	<i>Savonius no endplate</i>	<i>Savonius endplate</i>
2	0.00925	0.001139	0.001485
4	0.00924	0.005056	0.006027
5	0.01519	0.008181	0.010426
8	0.04174	0.022403	0.027689
10	0.06541	0.036158	0.046758

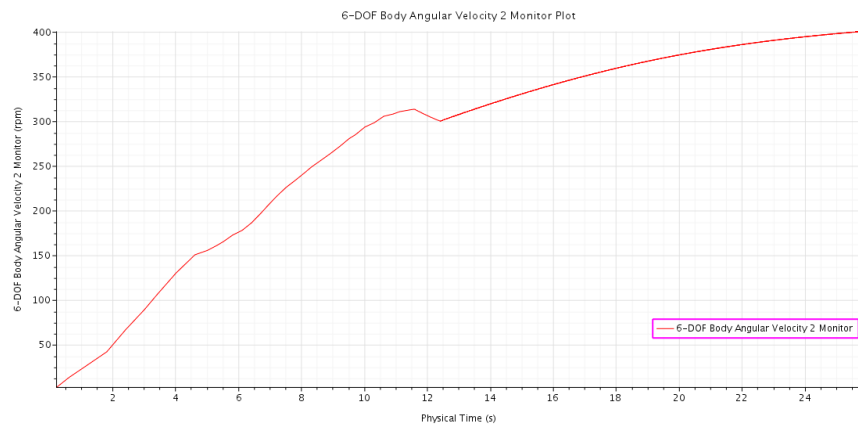


Gambar 4. 17 Grafik C_Q terhadap kecepatan inlet

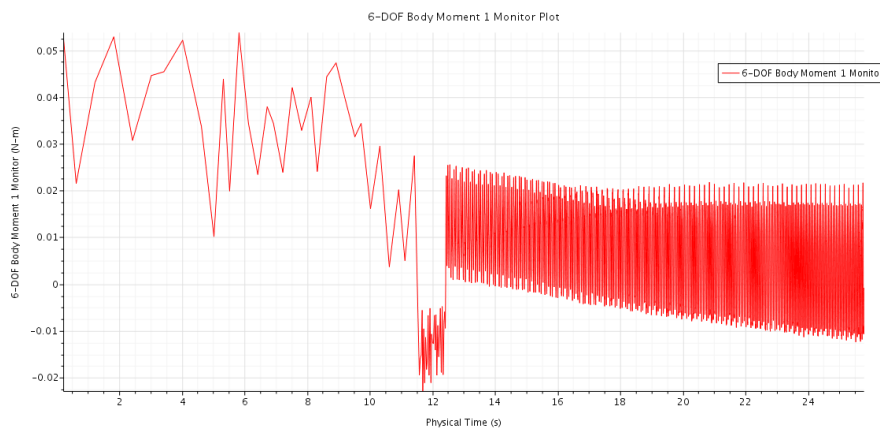
4.4. Simulasi *unsteady* FSI-1DOF

Pada simulasi FSI 1-DOF, kondisi awal model berada pada posisi diam dengan kecepatan angular 0 rad/s. Kemudian nilai massa dan momen inersia akan dimasukan sebagai data input. Nilai momen inersia awal didapatkan dari kalkulasi yang dilakukan program Inventor 2014. Nilai momen yang diambil adalah nilai momen Iyy. Data inersia arah Ixx, Iyy dan Izz ini harus diisi dengan nilai yang sama dan tidak bias di kosongkan salah satu. Time step yang digunakan pada simulasi FSI-1DOF diusahakan memenuhi nilai CFL. Untuk mempercepat simulasi time step yang akan dipakai akan di ubah dari yang paling besar 0.2 s kemudian diperkecil secara beruntun hingga mencapai 0.0005 s. Pada time step besar, dibutuhkan iterasi yang cukup banyak untuk mencapai stopping criteria momen x, y dan z. Selain itu penggunaan timestep besar menimbulkan trenline yang kurang bagus saat pengolahan data. Data kecepatan angular hanya bisa diambil dengan simulasi FSI-1 DOF. Kondisi ini sangat membantu apabila simulasi tidak memiliki data eksperimen sebagai acuan.

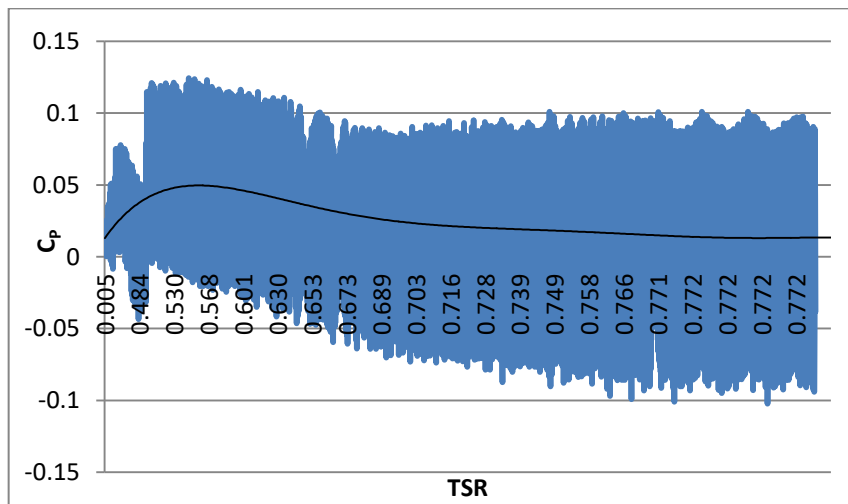
Pada penelitian ini juga dilakukan simulasi FSI-1 DOF pada turbin *Icewind*, *Savonius* tanpa dan dengan *endplate*. Simulasi dilakukan pada kecepatan inlet 10 m/s. Simulasi yang dilakukan pada turbin *Savonius* dengan *endplate* dilakukan dengan waktu yang lama. Time step yang digunakan bertingkat sebesar 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.01, 0.005, 0.001 dan 0.0005 sekon. Sedangkan pada simulasi *Icewind* dan *Savonius* tanpa *endplate* waktu simulasi dipersingkat dengan time step 0.2, 0.1 dan 0.005 sekon.



(a)



(b)



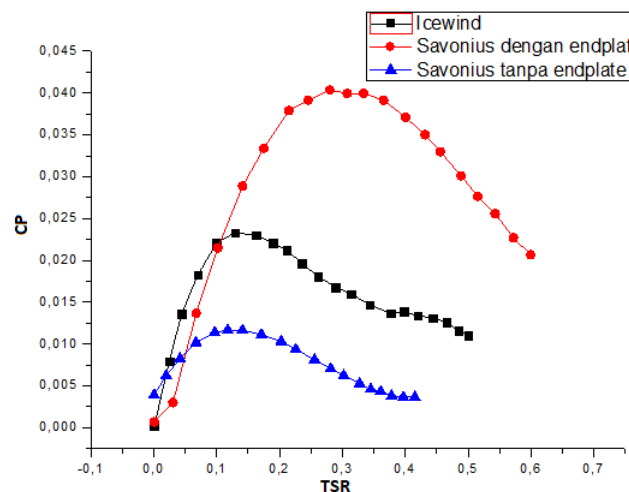
(c)

Gambar 4. 18 Grafik (a)*Physical time-kecepatan angular* (b) *Physical time-momen*(c)*TSR- C_p* pada simulasi FSI 1-DOF turbin *Savonius* dengan *Endplate*

Grafik pada gambar 4.18 (a) dan (b) dihasilkan oleh simulasi FSI 1-DOF. Hasil simulasi tersebut menunjukkan nilai kecepatan angular dan momen sebagai fungsi waktu. *Time-step* yang digunakan untuk melakukan proses *running* pada simulasi akan mempengaruhi kehalusan grafik yang terbentuk. Untuk mengurangi efek fungsi waktu dari *time step*, maka fungsi waktu harus diadikan sebagai bilangan tidak berdimensi yaitu sebagai TSR. Sehingga grafik 4.18 (a) dan (b) dapat diolah menjadi bilangan tak berdimensi nilai C_p sebagai fungsi dari TSR seperti gambar 4.18(c). Untuk mendapatkan nilai yang tidak terpengaruh fluktuasi digunakan rata-rata *trendline* seperti pada garis hitam gambar 4.18 (c).

4.4.1 Performa Turbin

Hasil simulasi turbin dinyatakan dengan grafik TSR dan C_p seperti gambar 4.19. Nilai C_p tertinggi dihasilkan oleh turbin *Savonius* dengan *endplate* sekitar 0.05. *Icewind* menghasilkan nilai C_p lebih besar dibandingkan *Savonius* tanpa *endplate*. Hal ini sesuai dengan perbandingan nilai C_Q yang telah dikemukakan pada penelitian *steady*. Pada daerah TSR dibawah 0.1, grafik turbin *Icewind* terlihat lebih kanan dibandingkan dengan *Savonius endplate*. Hal ini berarti *Icewind* dengan TSR kurang dari 0.1 memiliki potensi untuk bekerja lebih optimum dan menghasilkan C_p yang lebih besar pada kecepatan angin rendah. Kondisi ini dapat dimanfaatkan pada daerah dengan kecepatan angin rendah



Gambar 4. 19 Grafik C_p terhadap TSR kecepatan 2 m/s

4.4.2 Nilai Maksimum dan optimum

Dalam simulasi *unsteady* terdapat titik optimum kinerja turbin. Selain itu juga terdapat nilai maksimum turbin. Nilai maksimum turbin merupakan nilai yang dihasilkan turbin saat mulai memasuki kondisi *steady*. Tabel 45 menampilkan data performa maksimum yang mampu dihasilkan oleh turbin *Icewind*, *Savonius* tanpa dan dengan *endplate* pada kecepatan 2 dan 10 m/s. Turbin *Savonius endplate* diam yang digerakkan angin dengan kecepatan 2 dan 10 m/s mampu menghasilkan kecepatan angular paling tinggi apabila dibandingkan dengan turbin *Icewind* dan *Savonius* tanpa *endplate*. Selain itu turbin *Savonius endplate* juga menghasilkan C_Q dan C_P yang tinggi. *Icewind* turbin menghasilkan nilai C_P yang lebih besar dibandingkan dengan turbin *Savonius* tanpa *endplate*. Namun *Icewind* bekerja pada kecepatan angular terendah apabila dibandingkan dengan kecepatan angular *Savonius* tanpa dan dengan *endplate* dan nilai C_Q tertinggi. Penggunaan *endplate* seperti yang telah dibahas sebelumnya sangat efektif untuk mengurangi munculnya *wake* pada kecepatan tinggi.

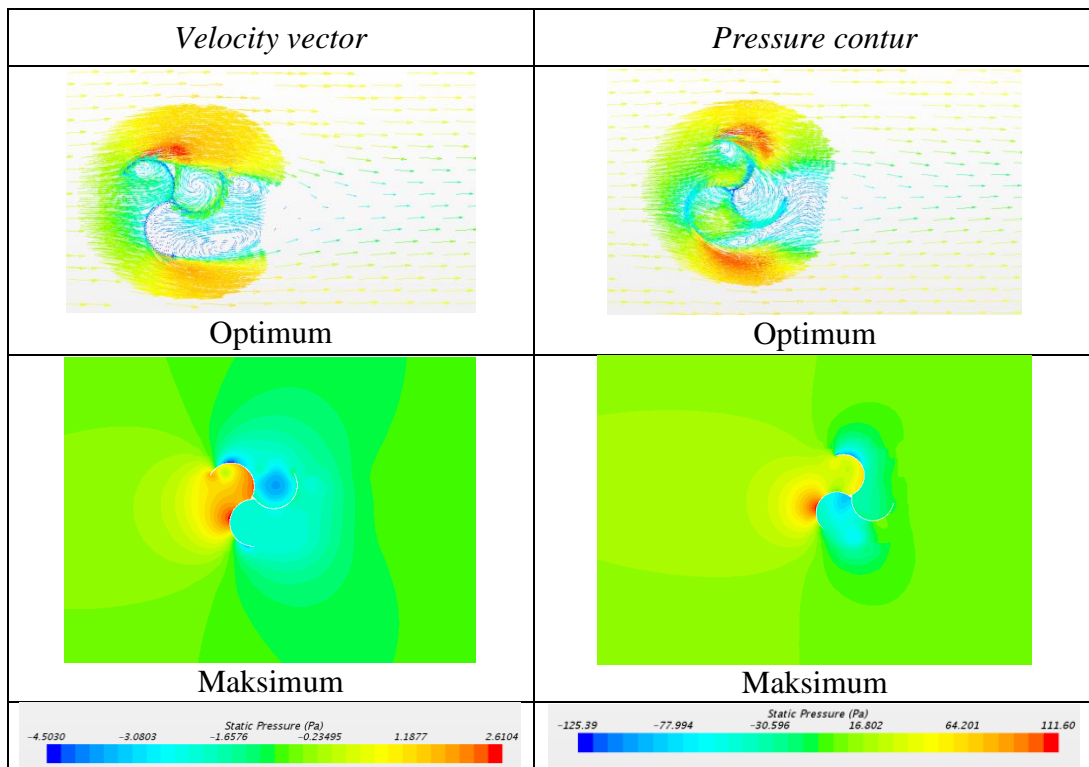
Tabel 4. 5 Nilai pada TSR maksimum simulasi *unsteady* 1 - DOF

V_{∞} (m/s)	Turbin	Nilai Maksimum			
		TSR	Kecepatan Angular (rpm)	C_Q	C_P
2	Savonius Endplate	0.614	98.496	0.0256	0.0157
	Icewind	0.447	50.647	0.0255	0.0114
	Savonius no Endplate	0.412	69.155	0.0089	0.0037
10	Savonius Endplate	0.576	593.542	0.0306	0.0176
	Icewind	0.491	279.423	0.0285	0.0140
	Savonius no Endplate	0.468	400.962	0.0109	0.0051

Tabel 4. 6 Nilai optimum simulasi *unsteady* 1 - DOF

V_{∞} (m/s)	Turbin	Nilai optimum			
		TSR	Kecepatan Angular (rpm)	C_Q	C_P
2	<i>Savonius Endplate</i>	0.2801	43.163	0.1441	0.0404
	<i>Icewind</i>	0.1291	13.682	0.1807	0.0233
	<i>Savonius no Endplate</i>	0.1177	19.558	0.0991	0.0117
10	<i>Savonius Endplate</i>	0.1365	105.183	0.3552	0.0485
	<i>Icewind</i>	0.0606	32.111	0.4482	0.0272
	<i>Savonius no Endplate</i>	0.0772	64.157	0.2141	0.0165

Tabel 4.6 menampilkan data kondisi optimum pada turbin *Icewind*, *Savonius* tanpa dan dengan *endplate*. Turbin *Savonius* dengan *endplate* menghasilkan C_P paling tinggi apabila dibandingkan dengan turbin *Savonius* tanpa *endplate* dan *Icewind*. Namun untuk menghasilkan C_P tertinggi, turbin *Savonius* harus bekerja pada kecepatan angular yang tinggi. Sedangkan turbin *Savonius* tanpa *endplate* menghasilkan C_P terendah namun memiliki kecepatan angular yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin *Icewind*. Momen merupakan resultan gaya yang bekerja pada turbin dihitung dari titik pusat putaran turbin. Turbin *Icewind* menghasilkan C_Q yang tinggi baik pada kondisi optimum maupun TSR maksimum. Hal ini dikarenakan turbin *Icewind* memiliki jari-jari rotor yang paling besar.



Gambar 4. 20 Grafik C_P terhadap TSR turbin *Savonius* dengan *Endplate*

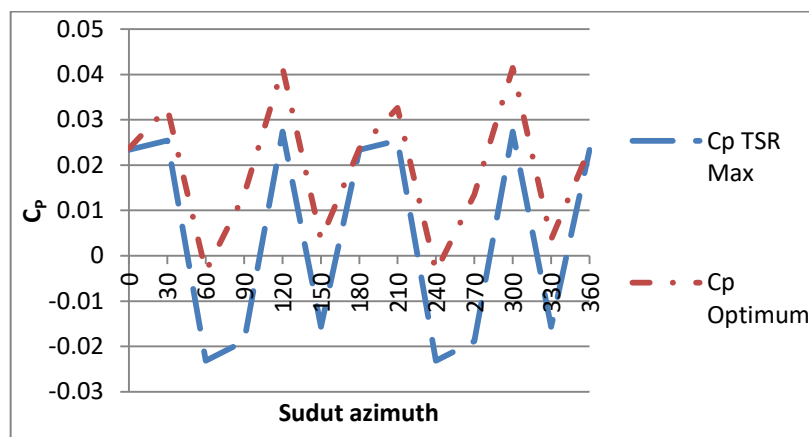
Dari data yang didapat dari nilai optimum *Savonius* tanpa *endplate*, nilai C_Q yang didapat dari simulasi dengan kecepatan 2 dan 10 m/s berbeda jauh. Hal ini dikarenakan pada titik optimum simulasi, kedua kecepatan tersebut

menghasilkan TSR dan posisi yang berbeda. Sehingga hasil yang di dapat menghasilkan perbedaan mencolok. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.20. Pada gambar tersebut selain posisi sudut azimuth yang berganti, range tekanan yang terdapat pada kecepatan 2m/s lebih kecil dibandingkan dengan 10 m/s. Ini berarti selain sudut azimuth terdapat perbedaan secara kinematik yang dialami oleh *Savonius* tanpa *endplate*. Pengaruh kinematis tersebut menyebabkan perbedaan bentuk *wake*, sebaran vektor kecepatan dan arah aliran.

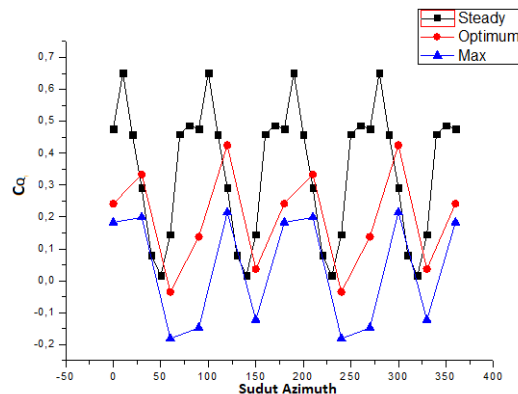
Pada turbin yang berputar terdapat gaya yang mendorong sudu *adversing blade* turbin untuk berputar. Terdapat gaya lain yang menghambat putaran turbin berupa gaya yang mendorong *reversing blade* turbin serta munculnya *wake* dan *backflow*. Putaran turbin akan bertambah apabila resultan gayanya meningkat. Namun setelah mencapai titik optimumnya, peningkatan gaya dorong akan juga akan meningkatkan gaya hambat pada turbin. Momen dapat dinyatakan sebagai bilangan tak berdimensi untuk menghilangkan efek pengaruh kecepatan dan dimensi. Nilai optimum merupakan titik kerja paling baik bagi turbin untuk menghasilkan C_p dan C_Q tertinggi pada TSR rendah. Turbin *Savonius* mencapai titik optimum saat bekerja pada TSR 0.432 pada kecepatan 2m/s dan 0.547 untuk kecepatan 10 m/s. Titik optimum yang dihasilkan turbin *Savonius endplate* memiliki nilai C_p dan kecepatan angular yang paling tinggi dibandingkan dengan turbin lain. Apabila diperhatikan pada kecepatan 2 m/s, *Icewind* miliki titik optimum saat berada pada TSR 0.327 dan kecepatan angular terendah 34.63 m/s. Namun nilai C_Q dan C_p yang dihasilkan hanya memiliki sedikit beda dengan *Savonius endplate* pada kecepatan yang sama. Turbin *Icewind* menghasilkan C_p lebih tinggi dibandingkan dengan *Savonius* tanpa *endplate* pada kecepatan angular yang paling rendah. Nilai C_Q yang dihasilkan *Icewind* lebih tinggi bila dibandingkan dengan *Savonius*, hal ini dikarenakan *Icewind* memiliki jari-jari rotor yang paling besar dibanding *Savonius* tanpa dan dengan *endplate*.

Pada penelitian BDFI perubahan data kuantitatif dan kuatitatif dapat ditampilkan pada setiap kenaikan timestep. Sebagai contoh, grafik 4.21 menunjukkan nilai C_p kondisi opimum kerja turbin disekitar TSR 0.5469 dan C_p kondisi yang mendekati mendekati *steady* disekitar TSR 0.6092. Trendline grafik

C_P simulasi *unsteady* menunjukkan kontur yang sama baik pada kondisi optimum maupun kondisi *steady*. Namun nilai C_P yang didapat dari kondisi putaran tersebut berbeda. Saat turbin berada pada kondisi mendekati titik optimum nilai C_P yang didapatkan dari setiap sudut azimuth menjadi lebih besar. Saat turbin akan mencapai kondisi *steady*, nilai C_P yang didapat dari sudu azimuth menjadi lebih kecil seperti yang terlihat di grafik. Hal ini dikarenakan saat mendekati kondisi *steady* perbedaan tekanan pada bagian sudu menjadi lebih kecil. Dengan kata lain pada kondisi *steady* pengaruh *adverse pressure gradient* menjadi lebih kecil.



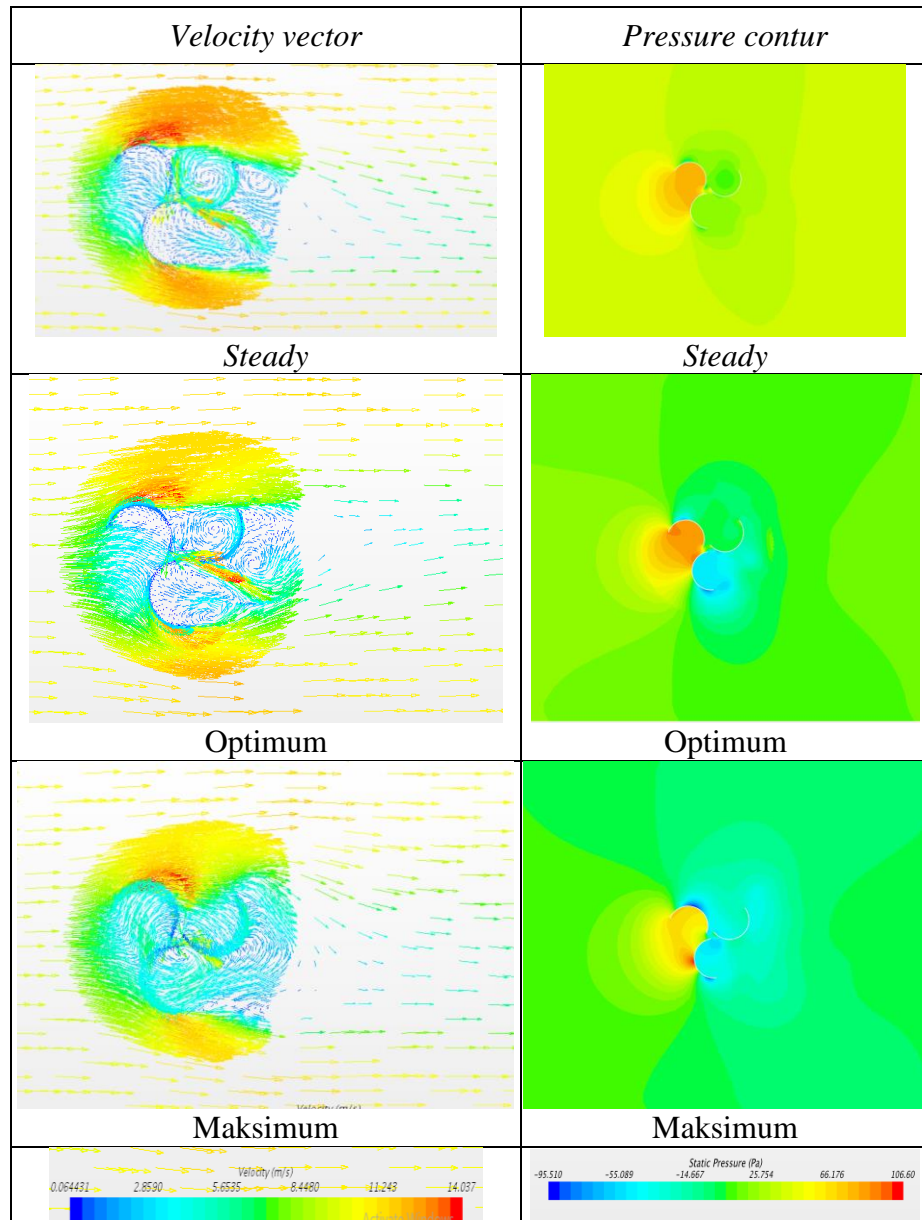
Gambar 4. 21 Grafik C_P maksimum dan optimum terhadap sudut azimuth



Gambar 4. 22 Grafik C_Q maksimum dan optimum terhadap sudut azimuth

Grafik 4.22 merupakan hubungan antara C_Q yang dihasilkan dari simulasi *steady* dibandingkan dengan grafik C_Q *unsteady* pada kondisi TSR maksimum dan optimum. Trendline yang dimiliki oleh grafik C_Q *steady* dan *unsteady* memiliki bentuk yang sama. Apabila dihubungkan dengan pengambilan data C_Q yang digunakan pada tabel 4.1, terdapat kesamaan antara nilai C_Q FSI 1-DOF dengan

data C_Q titik maksimum. Namun nilai C_Q optimum memiliki nilai yang jauh berbeda. Kondisi ini dapat dijelaskan dengan menggunakan *velocity vector* dan *pressure contour*.

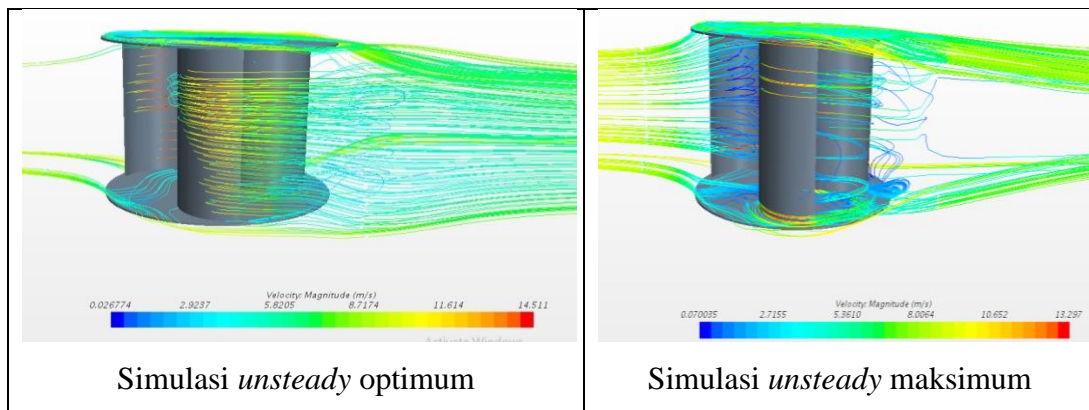


Gambar 4. 23 *Velocity vector* absolut dan *pressure contour* pada Savonius endplate

Pada gambar 4.23 terdapat *pressure contour* dan *velocity vector* pada turbin Savonius endplate pada kondisi *steady* dan *unsteady* 1-DOF pada TSR optimum dan maksimum. Dapat dilihat bahwa kondisi *steady* dan titik optimum memiliki vektor yang hampir sama pada *vector velocity*. Diantara sudu Savonius endplate memiliki sedikit celah berupa *overlap*. Udara yang terkumpul akan melewati *overlap*

untuk terus mengalirkan fluida menjauhi turbin. Aliran tersebut mendorong turbin untuk terus berputar. Namun pada saat kondisi maksimum diantara *overlap* tidak dilalui fluida dengan kecepatan tinggi. Sehingga terdapat perbedaan mencolok antara *velocity vector* dan pressure outlet *Savonius* pada optimum dan maksimum.

Selain pada kontur dan vector, simulasi *unsteady* juga digambarkan melalui pathline seperti pada gambar 4.24. Dibandingkan kondisi *steady* pathline yang dimiliki simulasi *steady*, hasil simulasi DFBI 1-DOF cenderung menyebar secara merata apabila dibandingkan dengan simulasi *steady*. Hal ini menunjukkan bahwa simulasi 1-DOF *unsteady* tidak terlalu sensitif terhadap bentuk mesh yang digunakan.



Gambar 4. 24 Pathline pada Savonius endplate

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Turbin *Savonius* yang dilengkapi dengan *endplate* menghasilkan nilai C_P , dan kecepatan angular yang tinggi dibandingkan turbin *Savonius* tanpa *endplate* dan *Icewind*. Turbin *Savonius* tanpa *endplate* menghasilkan C_Q dan C_P terendah walaupun kecepatan angular yang dihasilkan lebih tinggi dibanding *Icewind*. Sedangkan Turbin *Icewind* menghasilkan kecepatan angular paling rendah namun nilai C_Q yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan *Savonius* tanpa *endplate*.
2. Perbedaan nilai C_Q dan C_P dipengaruhi akibat adanya perubahan karakteristik aliran pada boundary layer fluida. Karakteristik yang dimaksud meliputi arah kecepatan, pressure, dan *vorticity*.
3. Nilai C_P *Icewind* pada $TSR < 0.1$ lebih tinggi apabila dibandingkan dengan *Savonius endplate*. Hal ini berarti turbin *Icewind* baik dioperasikan pada kecepatan angin rendah.
4. Penggunaan metode simulasi yang dilakukan dengan metode FSI menghasilkan data yang bervariasi namun membutuhkan waktu yang lama dan disertai dengan kemampuan komputer yang mumpuni. Sedangkan penggunaan metode *steady* menghasilkan hasil simulasi yang mendekati kondisi eksperimen statis. Error yang dihasilkan simulasi *unsteady* cukup tinggi hingga mencapai 10 kali lipat. Hal ini dikarenakan pengambilan data eksperimen dilakukan dengan kondisi diam, sehingga error yang dihasilkan dari simulasi *steady* kecil $\sim 3\%$. Namun simulasi *steady* membutuhkan banyak variasi untuk mendapatkan performa TSR.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pemilihan metode simulasi harus dilakukan diawal simulasi dengan memperhatikan data yang akan diambil serta sumber daya yang dimiliki untuk mendapatkan hasil yang efisien. Data yang akan diambil harus

ditentukan untuk menentukan pilihan solution yang diinginkan terutama pada metode FSI. Bila tidak di dipilih diawal data tidak bisa keluar.

2. Mesh pada simulasi *steady* harus dilakukan dengan teliti, karena simulasi *steady* sangat sensitif terhadap mesh.
3. Simulasi yang dilakukan selanjutnya turbin harus memiliki poros.
4. Simulasi yang dilakukan selanjutnya dapat difokuskan untuk menggunakan turbulensi transisi.
5. Ukuran Mesh yang digunakan pada daerah sliding mesh dan test section tidak boleh memiliki perbedaan yang jauh agar streamline aliran dapat tertangkap di Tecplot.

DAFTAR PUSTAKA

1. Agamloh, E.B., Wallace, A.K., Jouanne, A., 2007, "*Application of fluid–structure interaction simulation of an ocean wave energy extraction device*", Renewable Energy 33 (2008) 748–757.
2. Al-Faruk,A., Sharifian,S.A., Al-Atresh,S., 2012, "*Numerical Investigation of Performance of a New Type of Savonius Turbin*", 18th Australasian Fluid Mechanics Conference.
3. Al-Faruk,A., Sharifian,A., 2016,"*Flow field and performance study of vertical axis Savonius type SST wind turbine*", Energy Procedia 110 (2017) 235 – 242.
4. Alexander,A.J., and Holownia,B.P., 1978,"*Wind Tunnel Tests On A Savonius Rotor*", Journal of Industrial Aerodynamics, 3 (1978) 343—351.
5. Ali,M.H., 2013, "*Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed*", International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol. 3, Issue. 5, Sep - Oct. 2013 pp-2978-2986, ISSN: 2249-6645.
6. Aymane, E., Darhmaoui, H., Sheikh, N., 2017, "*Savonius Vertical Wind Turbine: Design, Simulation, And Physical Testing*", Al-Akhawayn University
7. Gupta,R., Deb,.B., Misra,R.D., 2012,"*Performance Analysis of a Helical Savonius Rotor with Shaft at 45° Twist Angle Using CFD*", Mechanical Engineering Research; Vol. 3, No. 1; 2013, ISSN 1927-0607 E-ISSN 1927-0615.
8. Jeon,K.S., Jeong,J.I., Pan,J.K., Ryu,K.W., 2014,"*Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines*", Renewable Energy 79 (2015) 167e176.
9. Mahmoud,N.H., El-Haroun,A.A., Wahba,E., Nasef,M.H., 2010, "*An experimental study on improvement of Savonius rotor performance*", Alexandria Engineering Journal (2012) 51, 19–25.
10. Mao,Z., and Tian,W., 2015,"*Effect of the blade arc angle on the performance of a Savonius wind turbine*", Advances in Mechanical Engineering 2015, Vol. 7(5) 1–10.
11. Magedi,M.S., and Norzelawati,A., 2014,"*Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines*", IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), ISSN (e): 2250-3021, ISSN (p): 2278-8719, Vol. 04.

12. Murai,Y., Nakada,T., Suzuki,T., Yamamoto,F., 2007, “*Particle tracking velocimetry applied to estimate the pressure field around a Savonius turbine*”, IOP Publishing, Meas. Sci. Technol. 18 (2007) 2491–2503.
13. Nasef,M.H., El-Askary,W.A., Hamid,A.A., Gad,H.E., 2013, “*Evaluation of Savonius rotor performance: Static and dynamic studies*”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 123 (2013) 1–11.
14. Ricci,R., Romagnoli,R., Montelpare,S., Vitali,D., 2014, “*Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting systems*”, Journal of Applied Energy 161 (2016) 143–152.
15. Saha,U.K., Thotla,S., Maity D., 2008,“ *Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments*”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96 (2008) 1359–1375.
16. Santhakumar,S., Palanivel,I., Venkatasubramanian,K., 2016,“ *A study on the rotational behaviour of a Savonius Wind turbine in low rise highways during different monsoons*”, Energy for Sustainable Development 40 (2017) 1–10.
17. Shaheen,M., El-Sayed,M., Abdallah,S., 2015,“ *Numerical study of two-bucket Savonius wind turbine cluster*”, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 137 (2015) 78–89.
18. Tahani, M., Rabbani, A., Kasaeian, A., Mehrpooya, M., Mirhosseini, M., 2017, ” *Design and numerical investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability*”, 10.1016/j.energy.2017.04.125.
19. Wakui,T., Yokoyama,R., Arase,H., 2009, “*Influence of Load Level on Performance of Standalone Vertical Axis Wind Turbine System*”, Wind Engineering Vol. 33, NO. 3, 2009 PP 213–236

RIWAYAT PENULIS



Zain Lillahulhaq dilahirkan di Kota Tulungagung, Jawa Timur pada tanggal 03 September 1994 dan merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan Sekolah Dasar di MI Sukorejo (2000-2006), Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 3 Tulungagung (2006-2009), dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Kedungwaru (2009-2012). Setelah menyelesaikan Sekolah Menengah Atas, Penulis menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Mesin FTI ITS Surabaya sebagai mahasiswa S1 (2012-2016). Penulis mengambil bidang studi Konversi Energi, khususnya pada Lab. Mekanika Fluida. Kemudian penulis menempuh studi S2 (2016-2019) di jurusan Teknik mesin ITS pada bidang Rekayasa Konversi Energi. Penulis melakukan penelitian tugas akhir dalam bidang simulasi Turbin angin.